

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่มะม่วงเพื่อการส่งออก



คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | | |
|------------------------------------|----------------------|------------------|
| 1. ผศ.ดร.จาดุพงศ์ วาฤทธิ์ | มหาวิทยาลัยแม่โจ้ | หัวหน้าโครงการ |
| 2. อ.ดร.วารุณี ศิริขจรจารุ | มหาวิทยาลัยแม่โจ้ | ผู้ร่วมวิจัย |
| 3. ศ.ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ | ที่ปรึกษาโครงการ |

สนับสนุนโดย สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ และ
สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ.และสกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

1011/48

บทคัดย่อ

การกำจัดกักกันหนอนแมลงวันทอง (*Dacus dorsalis* H.) ในมะม่วง (*Mangifera indica* L.) เป็นกระบวนการที่จำเป็นในการส่งออกมะม่วงไปยังประเทศพัฒนาแล้ว วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อพัฒนาระบวนการอบร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับไอน้ำในการกำจัดกักกันหนอนแมลงวันทองในมะม่วง ในเบื้องต้นได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิภายในมะม่วง จากนั้นได้ทำการพัฒนากฎเพื่อใช้กระบวนการกำจัดกักกัน โดยใช้กราฟของความร้อน-อัตราการตาย-เวลา (TDT) ซ้อนทับกับกราฟของความร้อน-คุณภาพ-เวลา (TDT) แล้วได้พัฒนาระบวนการอบร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับไอน้ำให้สมบูรณ์จากข้อมูลของกราฟที่พัฒนาขึ้น ผลการวิจัยพบว่า อุณหภูมิที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดกักกันหนอนแมลงวันทองอยู่ในช่วงสูงกว่า 46°C โดยมีช่วงเวลาการรักษาอุณหภูมิคงที่ที่แตกต่างกันได้ถึง 20 นาที ในการพัฒนาระบวนการอบร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับไอน้ำ ได้อุณหภูมิภายในผลมะม่วงในระดับ $48-55^{\circ}\text{C}$ อัตราการตายของหนอนระยะไข่ 100% การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมียังสามารถของมะม่วงที่ผ่านการอบร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับไอน้ำ ซึ่งได้แก่ สี ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (TA) ปริมาณสารที่ละลายน้ำทั้งหมด (TSS) อัตราส่วนระหว่าง TSS/TA และความแน่นเนื้อ พบว่ามีความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) จากมะม่วงสด กระบวนการอบร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับไอน้ำมีผลให้เกิดการเสียหายในมะม่วงเนื่องจากความร้อนน้อยกว่าการอบด้วยไอน้ำแบบปกติ และยังสามารถลดระยะเวลาของกระบวนการกำจัดกักกันในช่วงการให้ความร้อนขึ้นต้นได้มากกว่า 90%

Abstract

Quarantine heat treatment to disinfest oriental fruit fly (*Dacus dorsalis* H.) in mangoes (*Mangifera indica* L.) is necessary for fruits exported to developed countries. Objective of this research was to develop a microwave-vapor heat treatment (MVHT) in mango to quarantine oriental fruit fly. Factors affecting an increase in internal temperature were preliminarily studied. Further, Thermal-Death-Time (TDT) and Thermal-Quality-Time (TQT) overlay plot was established. MVHT treatments were finally developed based on TDT and TQT information. Results show that an effective quarantine temperature should be higher than 46°C with varied holding time at a constant temperature up to 20 minutes. The development of MVHT resulted in internal temperature range from 48-55°C with 100% disinfestation of oriental fruit fly egg. Physio-chemical properties of MVHT mango, namely, color, titratable acid (TA), total soluble solid (TSS), TSS/TA, and firmness, were not significantly difference ($p>0.05$) than the control. MVHT offered less percent of heat damage on mango than conventional VHT and shortened quarantine process time more than 90% during come-up period.

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

โครงการวิจัย การใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่มะม่วงเพื่อการส่งออก เป็นโครงการที่พัฒนาเทคนิคการอบร้อนมะม่วงด้วยไมโครเวฟเพื่อกำจัดกักกันหนอนแมลงวันทอง ซึ่งในการส่งออกมะม่วงในปัจจุบันจะใช้อบร้อนด้วยไอน้ำ การดำเนินงานวิจัยแบ่งเป็น 2 ระยะ คือ ระยะที่ 1 เป็นทดสอบเพื่อดูการกระจายตัวของความร้อนในผลมะม่วง ในขั้นตอนนี้คณะผู้วิจัยได้ทราบพื้นฐานเชิงลึกของการกำเนิดความร้อนด้วยไมโครเวฟภายในผลมะม่วง จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาวางแผนการทดลองในระยะที่ 2 ซึ่งเป็นการพัฒนากระบวนการอบร้อนให้สมบูรณ์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับไอน้ำ และทำการลดอุณหภูมิให้ได้ระดับที่สามารถเก็บรักษาโดยไม่มีการเสียหายเชิงคุณภาพ

ผลการวิจัยระยะที่ 1 พบว่า มะม่วงที่วางตัวในแนวนอนผ่านคลื่นไมโครเวฟ ขนาด 400 วัตต์ เป็นเวลา 40 วินาที ทำให้มีอุณหภูมิภายในที่ตำแหน่งซิดเมลิต เพิ่มขึ้นจาก 25°C เป็น 46°C มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิ 47°C ที่ใช้ในการอบไอน้ำทางการค้าในปัจจุบัน ผลการวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นประโยชน์ในการให้ความร้อนแก่มะม่วงในระยะเริ่มต้น เนื่องจากการอบร้อนด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวไม่สามารถคงอุณหภูมิเนื้อภายในให้คงที่ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการอบร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับไอน้ำเพื่อคงอุณหภูมิให้ได้ตามที่ต้องการ ผลการวิจัยระยะที่ 2 หลังจากได้พัฒนาการอบร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับไอน้ำแล้ว พบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟ 400 วัตต์ เป็นระยะเวลาไม่เกิน 1 นาที ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเนื้อเพิ่มขึ้นได้ ตั้งแต่ $48-55^{\circ}\text{C}$ เมื่อปรับใช้กับการทดลองกำจัดกักกันหนอนแมลงวันทองระยะไข่ที่เพาะในมะม่วงแล้ว พบอัตราการตาย 100% และไม่พบความเสียหายที่เปลือก แต่มีการเสียหายในเนื้อเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (1.1%) ซึ่งดีกว่าการอบด้วยไอน้ำที่มีอัตราการเสียหายทั้งที่เปลือกและในเนื้อ (16.2% และ 8.2% ตามลำดับ) นอกจากนี้ยังพบว่า ในช่วงระยะการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิมะม่วงในขั้นต้นนั้น การอบร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับไอน้ำสามารถลดระยะเวลาอบร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนด้วยไอน้ำแบบปกติถึง 90% ส่วนในด้านคุณภาพนั้น พบการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพและเคมีของมะม่วงที่ผ่านกระบวนการอบร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับไอน้ำที่ไม่แตกต่างจากมะม่วงสด จึงสรุปได้ว่ามะม่วงที่ผ่านการอบร้อนมีอัตราการสุกเท่ากันกับมะม่วงสดที่ไม่ผ่านกระบวนการอบร้อนซึ่งเก็บที่อุณหภูมิและความชื้นเดียวกัน ($13^{\circ}\text{C}/80\%\text{RH}$)

ปัญหาจากงานวิจัย พบว่าการใช้ไมโครเวฟยังมีจุดอ่อนอยู่เล็กน้อย ได้แก่ การเกิด Overheat เป็นบางจุดในเนื้อมะม่วงเนื่องจากการรวมศูนย์ของไมโครเวฟ อย่างไรก็ตาม เมื่อหากมีการศึกษาเชิงลึกถึงลักษณะของสนามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยเครื่องมือและงบประมาณที่พร้อมมากขึ้น ก็จะสามารถออกแบบระบบที่ทำให้มีการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟได้สม่ำเสมอ และสามารถลดข้อจำกัดที่เป็นจุดอ่อนของการอบร้อนด้วยไมโครเวฟดังกล่าวลงได้ในอนาคต

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

มะม่วง (*Mangifera indica* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีศักยภาพการส่งออกสูง ตลาดส่งออกมะม่วงที่สำคัญของไทยได้แก่ จีน เกาหลี ไต้หวัน ส่วนประเทศพัฒนาแล้ว เช่น ประเทศประชาคมยุโรป ญี่ปุ่น อเมริกา และออสเตรเลีย เป็นต้น ยังเป็นตลาดใหม่ที่น่าจะมีแนวโน้มการส่งออกได้ดีเช่นกัน เนื่องจากราคาในท้องตลาดของประเทศเหล่านี้ค่อนข้างสูง ในปี 2544 ประเทศไทยมีการผลิตมะม่วงจำนวน 1.47 ล้านไร่ ได้ผลผลิต 1.25 ล้านตัน แต่ปริมาณการส่งออกมีเพียงแค่ 3-5 พันตัน ซึ่งคิดเป็นปริมาณน้อยกว่า 1% ของผลผลิตที่ได้ ในขณะที่ประเทศบราซิล ซึ่งมีการผลิตได้เพียง 9 แสนตัน แต่สามารถส่งออกได้ถึง 7 หมื่นตัน คิดเป็น 7.7% ของกำลังการผลิตมะม่วงในบราซิล (สุรชา, 2545) ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลดังกล่าวแล้วจะเห็นได้ว่า ประเทศไทยยังต้องพัฒนาการส่งออกมะม่วงให้สามารถแข่งขันกับตลาดโลกให้ดีกว่านี้ ทั้งในแง่ต้นทุนและคุณภาพของมะม่วงที่ทำการส่งออก

ปัญหาที่สำคัญอันหนึ่งในการส่งออกมะม่วงคือ เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อกำจัดกักกัน (Quarantine treatment) หนอนแมลงวันทอง (*Dacus dorsalis* H.) ในประเทศไทยผู้ประกอบการจะใช้การกำจัดด้วยการอบไอน้ำ (Vapor heat treatment) การอบไอน้ำมะม่วงเพื่อกำจัดหนอนแมลงวันทองสำหรับการส่งออกเป็นวิธีการที่ใช้เวลานาน จากการเก็บข้อมูลด้วยการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการในจังหวัดฉะเชิงเทรา พบว่า เมื่อมะม่วงผ่านการอบไอน้ำในระดับอุตสาหกรรมแล้ว มีมะม่วงบางส่วนเกิดการเสียหายเนื่องจากความร้อนที่ได้รับระหว่างการอบไอน้ำ ซึ่งจะปรากฏให้เห็นชัดเจนที่ปลายทางขนส่ง ณ ประเทศญี่ปุ่น ทำให้สูญเสียรายได้จากการขายผลผลิต จากเอกสารของศูนย์พัฒนาการผลิตและควบคุมศัตรูผักผลไม้เพื่อการส่งออก มะม่วงที่ส่งออกสู่ประเทศญี่ปุ่นจะต้องทำการอบไอน้ำโดยให้จุดเย็นสุดที่ขีดเมลิต (Cold spot) ของผลมะม่วงมีอุณหภูมิ 47°C เป็นเวลา 20 นาที รวมระยะเวลาทั้งหมดที่มะม่วงจะถูกอบด้วยไอน้ำไม่น้อยกว่า 50 นาที การให้ความร้อนเป็นเวลานานเช่นนี้อาจก่อให้เกิดผลเสียได้ 2 ประการ คือ 1) อาจทำให้มะม่วงเองเกิดความเครียดเนื่องจากความร้อน (Thermal stress) ทำให้คุณภาพของผลมะม่วงลดลง ทั้งนี้การเสียหายเนื่องจากความร้อนจะปรากฏในลักษณะที่เป็นรอยขีดมะม่วงบางลูกสามารถสังเกตเห็นได้ทันทีภายหลังการให้ความร้อน ในขณะที่บางลูกอาจต้องใช้เวลาประมาณ 3-4 วันจึงจะแสดงอาการ และ 2) ต้นทุนที่สูงของการอบไอน้ำที่ใช้เวลานาน

การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นวิธีการแบบหนึ่งที่สามารถกำเนิดความร้อนภายในเนื้อของอาหารได้อย่างรวดเร็ว ปัจจุบันการใช้การใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถทำได้ตั้งแต่ระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ไปจนถึงระดับครัวเรือน จากประโยชน์ดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้คลื่นไมโครเวฟมาช่วยเพื่อลดระยะเวลาในการอบร้อนมะม่วง อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าคลื่นไมโครเวฟจะมีข้อดีในเรื่องสามารถกำเนิดความร้อนในระยะเวลาอันสั้น แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในด้านความสามารถทะลุทะลวง (Penetration capacity) และความสม่ำเสมอของความร้อน (Heating uniformity) ตัวอย่างที่ทดสอบ

ซึ่งยังจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม โครงการวิจัยนี้เป็นงานวิจัยพื้นฐานนำร่องที่จะศึกษาถึงลักษณะการให้ความร้อนซึ่งแพร่กระจายในเนื้อมะม่วงภายหลังจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อศึกษาแนวโน้มในการใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อกำจัดหนอนแมลงวันทองในมะม่วง และเปรียบเทียบคุณภาพของมะม่วงที่ได้ภายหลังจากการผ่านกระบวนการดังกล่าว ข้อมูลจากโครงการวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อพัฒนาเครื่องมือและวิธีการใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อกำจัดหนอนแมลงวันทองในระดับอุตสาหกรรมเพื่อการส่งออกต่อไป โครงการวิจัยนี้จะทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ในด้านการใช้เทคโนโลยีไมโครเวฟในการกำจัดโรคแมลงในมะม่วงเพื่อการส่งออก เป็นก้าวใหม่ที่สำคัญในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่มีอยู่ในประเทศอยู่แล้วมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ลดการนำเข้าเทคโนโลยีทางอุตสาหกรรมเกษตรจากต่างชาติได้ ซึ่งในประเทศไทยยังไม่มีผู้เริ่มดำเนินการวิจัยโดยใช้เทคโนโลยีนี้มาก่อน ในขณะที่ต่างประเทศ เช่น อเมริกา เริ่มทำการวิจัยโดยวิธีนี้มาแล้วประมาณ 6-7 ปี ในผลไม้ชนิดอื่น เช่น เชอร์รี่ และอัลมอนต์ เป็นต้น นอกจากนี้โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยแบบสหวิทยาการ (Interdisciplinary research) ขนาดเล็กที่ใช้องค์ความรู้พื้นฐานทั้งทางด้านทางวิศวกรรม กัญญาวิทยา และเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อการส่งออกผลไม้ ซึ่งผู้วิจัยจำเป็นต้องทำวิจัยเพื่อให้ได้องค์ความรู้ดังกล่าวก่อนที่จะขยายผลเพื่อสร้างเครื่องมือระดับอุตสาหกรรมต่อไปภายหลังจากโครงการนี้เสร็จสิ้นลง ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ยังใช้เป็นเทคโนโลยีต้นแบบเพื่อใช้สำหรับการส่งออกผลไม้ชนิดอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับมะม่วงได้อีกด้วย

2. วัตถุประสงค์

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

- 2.1 เพื่อศึกษาความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟและรูปแบบการกระจายความร้อนในผลมะม่วงจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ
- 2.2 เพื่อทดสอบการกำจัดหนอนแมลงวันทองในผลมะม่วงด้วยคลื่นไมโครเวฟ
- 2.3 เพื่อหาคุณภาพของมะม่วงภายหลังจากผ่านการกำจัดหนอนแมลงวันทองด้วยคลื่นไมโครเวฟแล้ว

3. กรอบแนวความคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

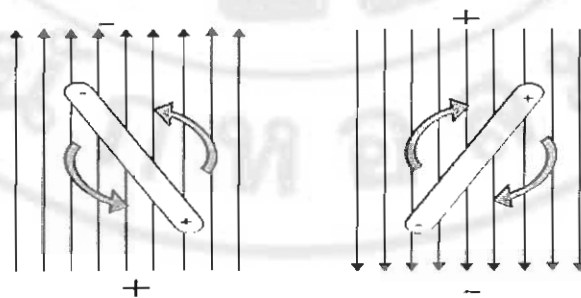
3.1 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ไมโครเวฟ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในช่วง 300 MHz ถึง 300 GHz คลื่นไมโครเวฟสามารถส่งพลังงานผ่านสุญญากาศโดยการแปรผันของเวลากับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น (Stuchly and Stuchly, 1983) ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่อนุญาตให้ใช้ในครัวเรือนและอุตสาหกรรมในประเทศสหรัฐอเมริกา คือ 2450 และ 915 MHz (Feng, 2000) ส่วนเตาอบไมโครเวฟ

ขนาดครัวเรือนในประเทศไทยนั้นจะใช้ความถี่ 2,450 MHz ในการให้ความร้อนแก่อาหารนั้น คลื่นไมโครเวฟจะทะลุทะลวงเข้าไปในอาหารโดยตรง โดยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟจะเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อน โดยทั่วไปแล้ว อาหารที่มีความชื้นสูง เช่น ผลไม้ต่าง ๆ จะมีการแปลงเป็นพลังงานความร้อนได้ง่ายเนื่องจากคลื่นไมโครเวฟจะไปเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก เกิดการหมุนของโมเลกุลของน้ำ และกำเนิดเป็นความร้อนในที่สุด (Singh and Heldman, 1993) ด้วยคุณลักษณะความสามารถในการทะลุทะลวง (Penetration capacity) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในเนื้อวัสดุต่าง ๆ ได้สูง คลื่นไมโครเวฟจึงสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นความร้อนจากภายในเนื้อผลไม้ ซึ่งผู้วิจัยตั้งสมมติฐานว่า การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟแก่ผลไม้จะส่งผลในแง่ของการลดระยะเวลากระบวนการให้ความร้อนแก่ผลไม้เร็วกว่า ในขณะที่ยังสามารถลดการเสื่อมคุณภาพของผลไม้ได้ดีกว่าการให้ความร้อนแบบอบไอน้ำ ซึ่งเป็นการให้ความร้อนถูกกระทำจากภายนอกสู่เนื้อผลไม้เป็นเวลานาน ๆ

3.2 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนของไมโครเวฟ

ตัวคลื่นไมโครเวฟเองไม่ได้ให้ความร้อน แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุนั้นเกิดจากการดูดซับคลื่นไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน โมเลกุลมีขั้วในผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งโดยทั่วไปได้แก่น้ำ เป็นส่วนที่เกิดปฏิสัมพันธ์ (Interaction) กับคลื่นไมโครเวฟ น้ำเป็นโมเลกุลมีขั้วเนื่องจากมีขั้วบวกและลบ เมื่อน้ำอยู่ในสนามไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟ (Microwave electric field) มันจะพยายามจัดเรียงโมเลกุลให้เป็นไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟ เช่นเดียวกับเศษขี้เลื่อยเหล็กที่พยายามจัดเรียงตัวเองในสนามแม่เหล็ก แต่เนื่องจากทิศทางของขั้วสนามไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟเปลี่ยนสลับไปมาฉับพลัน ๆ ครั้งต่อวินาที โมเลกุลของน้ำซึ่งถูกจำกัดด้วยเนื้อที่เพียงเล็กน้อย ในอาหารจะเริ่มหมุนในทิศทางหนึ่ง เมื่อสนามไฟฟ้าไมโครเวฟสลับขั้ว โมเลกุลของน้ำก็จะหมุนไปอีกทิศทางหนึ่งด้วยความถี่สูงเช่นกัน (ภาพที่ 1) การหมุนสลับไปมาเช่นนี้จะทำให้เกิดพลังงานจลน์สูง และเปลี่ยนแปลงเป็นความร้อนในที่สุด



ภาพที่ 1. โมเลกุลมีขั้ว (เช่นน้ำ) ประพฤติตัวเหมือนแม่เหล็กเล็ก ๆ ในสนามไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟ และพยายามที่จะหมุนสลับไปมาอย่างรวดเร็ว

สมการที่นิยมใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟได้แก่การคาดคะเนปริมาณความร้อนที่ได้จากการดูดซับคลื่นไมโครเวฟดังนี้ (Decareau, 1992)

$$P = 2\pi\epsilon_0\epsilon''fE^2 \quad [1]$$

เมื่อ P = พลังงานดูดซับ (watts/cm³)

ϵ_0 = ค่าไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของสุญญากาศ (8.85×10^{-12} farads/m)

ϵ'' = ค่าไดอิเล็กตริกสูญเสีย (Dielectric loss factor) ของอาหาร

f = ค่าความถี่ของพลังงานไมโครเวฟ (2450 MHz สำหรับตู้อบไมโครเวฟครัวเรือน)

E = เกรเดียนความต่างศักย์ (Voltage gradient) (volts/cm)

เนื่องจากค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (E) และค่าความถี่ (f) ค่อนข้างจะคงที่สำหรับเตาอบไมโครเวฟแต่ละตู้ ดังนั้นค่าที่แปรผันไปจึงมีแต่ค่าไดอิเล็กตริกสูญเสีย ϵ'' ค่าว่าสูญเสียมาจากการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียเมื่อวิ่งผ่านตัวเก็บประจุในช่วงจังหวะเปิดและปิด ซึ่งพลังงานสูญเสียส่วนหนึ่งจะถูกแปลงไปเป็นความร้อน การเปรียบเทียบนี้ได้ถูกนำมาใช้กับเทคโนโลยีการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ สำหรับวัสดุที่มีค่าการสูญเสียมาก (Lossy) จะเป็นวัสดุที่ค่อนข้างจะดูดซับความร้อนได้ดี ส่วนวัสดุที่มีค่าการสูญเสียน้อย (Low loss) จะเป็นวัสดุที่ดูดซับความร้อนได้ไม่ดี

3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีงานวิจัยต่างประเทศไม่มากนักที่ตีพิมพ์เกี่ยวกับการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งได้แก่คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) และคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency) เพื่อการกำจัดแมลงและโรคพืชในผลไม้ Ikediala et al. (2002) ได้พัฒนาวิธีการกำจัด Codling moth ในผลเชอร์รี่โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ 27 MHz เป็นแหล่งให้ความร้อนแก่ผลเชอร์รี่ พบว่าตัวอ่อนของ Codling moth ที่ถูก Inoculate ในผลเชอร์รี่ถูกกำจัดได้มากกว่า 99% โดยใช้เวลาประมาณ 7 ถึง 10 นาที (2-5 นาทีในการให้ความร้อนและอีกประมาณ 5 นาทีในการคงอุณหภูมิที่จุดเย็นสุดที่ 50°C) และกล่าวว่าวิธีนี้จะใช้เป็นวิธีการกำจัดแมลงในผลไม้ได้ดีพอ ๆ กับวิธีรมควันด้วยสารเมธิลโบรไมด์ (Methy Bromide) เนื่องจากดัชนีบ่งชี้คุณภาพของเชอร์รี่และอัตราการตายของหนอน Codling Moth เท่าเทียมกันหรือดีกว่า ดังนั้นวิธีการใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อฆ่าหนอนแมลงผลไม้อาจใช้ทดแทนวิธีรมควันด้วยสารเคมีได้ในอนาคต เพราะกฎหมายสิ่งแวดล้อมในสหรัฐอเมริกากำหนดให้เลิกใช้สารนี้ภายในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2548

Karabulut and Baykal (2002) ได้ทดลองใช้เตาอบไมโครเวฟเพื่อควบคุมโรคพืชในผลพีช (Peach fruit) พบว่า ผลพีชที่ถูก Inoculated ด้วย *Botrytis cinerea* และ *Penicillium expansum* ซึ่งผ่านการฆ่าเชื้อด้วยเตาอบไมโครเวฟครัวเรือน 2,450 MHz เป็นเวลา 2 นาที มีอัตราการติดเชื้อต่ำกว่าผลพีชควบคุม โดยที่ผลพีชไม่ได้เสื่อมคุณภาพในด้านความแน่นของเนื้อ (Firmness) หรือทำให้เกิดรอย

แตกหักที่ผิวของผลไม้ และได้แนะนำว่า วิธีนี้น่าจะเป็นวิธีควบคุมโรคพืชได้อีกแบบหนึ่งซึ่งสามารถใช้เป็นกระบวนการฆ่าเชื้อก่อนการเก็บรักษา

จะเห็นได้ว่าการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในการควบคุมโรคพืชและหนอนแมลงวันทองมีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้เป็นวิธีการทางเลือกได้อีกวิธีหนึ่งในอนาคตอันสั้นนี้ ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคนิคดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมต่อเศรษฐกิจและความต้องการของประเทศไทย

4. การดำเนินการวิจัยและผลการวิจัย

4.1 การดำเนินงานวิจัยตามวัตถุประสงค์ 2.1

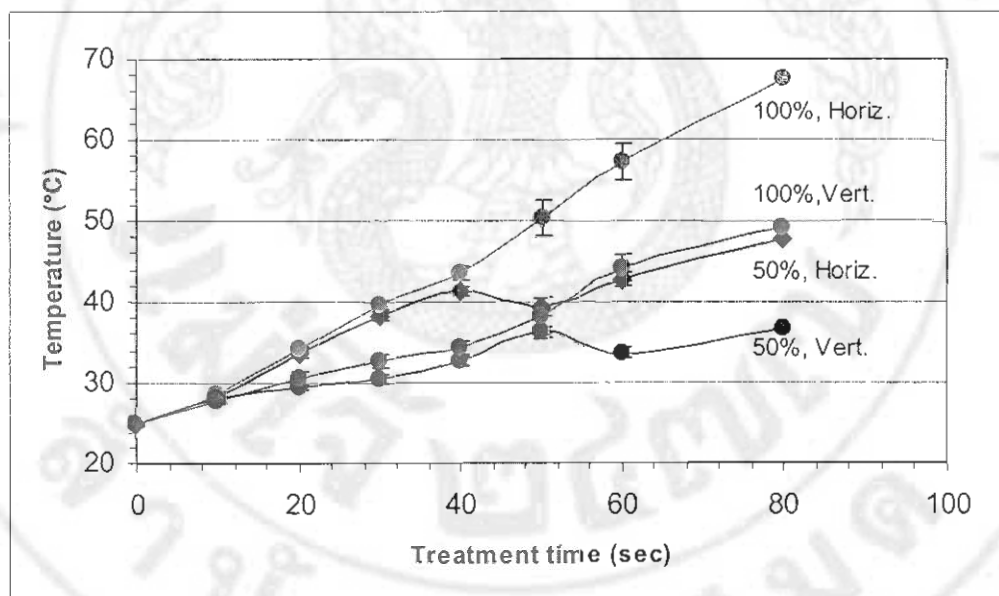
1. การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ เนื่องจากทุนการวิจัยมีจำกัด ดังนั้นการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งสำคัญ อุปกรณ์การทดลองที่สำคัญได้แก่ หัววัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งจัดทำขึ้นโดยใช้เข็มฉีดยาสแตนเลสสตีลเบอร์ 15 ทำเป็นหัววัดต่อกับสายเทอร์โมคัปเปิล Type T และต่อเข้ากับ Datalogger รุ่น AI210 (Wisco, Co. Ltd, Bangkok, Thailand) และเขียนโปรแกรมพ่วงต่อเพื่อเก็บข้อมูลโดยใช้โปรแกรม LabView™ ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิดังกล่าวมีความแม่นยำในการเก็บข้อมูลที่ $\pm 1^{\circ}\text{C}$

2. การทดลองอบร้อนมะม่วงด้วยไมโครเวฟเบื้องต้น ในการทดลองเพื่ออบร้อนมะม่วงด้วยไมโครเวฟนั้น ได้ทดลองเบื้องต้นเพื่อดูผลการกระจายตัวและการเสียหายของมะม่วงเนื่องจากความร้อนจากไมโครเวฟเป็นลำดับแรก ในการทดลองชุดแรกใช้มะม่วงน้ำดอกไม้ ขนาด Size L (350-380 กรัม) การทดสอบเบื้องต้นพบว่า มะม่วงที่วางในแนวตั้งมีการกระจายตัวของความร้อนไม่สม่ำเสมอเมื่อวัดด้วยหัววัดอุณหภูมิ คณะผู้วิจัยได้ทดลองหลายวิธีเพื่อลดการเสียหายเนื่องจาก Heat burn เช่น การใช้หุ้ม Aluminium foil ในส่วนหัวและท้ายของมะม่วง การอบร้อนมะม่วงขณะอยู่ในตัวกลางน้ำหรือน้ำเกลือ และการวางมะม่วงในแนวตั้งและแนวนอน ผลการทดลองพบว่า การวางมะม่วงในแนวนอนให้ผลการกระจายตัวที่ดีกว่าและง่ายกว่าการทดลองด้วยวิธีอื่น ดังนั้นการทดลองจริงจึงศึกษาลงลึกในส่วนของการวางผลมะม่วงเพื่อให้ได้ผลการกระจายตัวของความร้อนที่ดีขึ้น

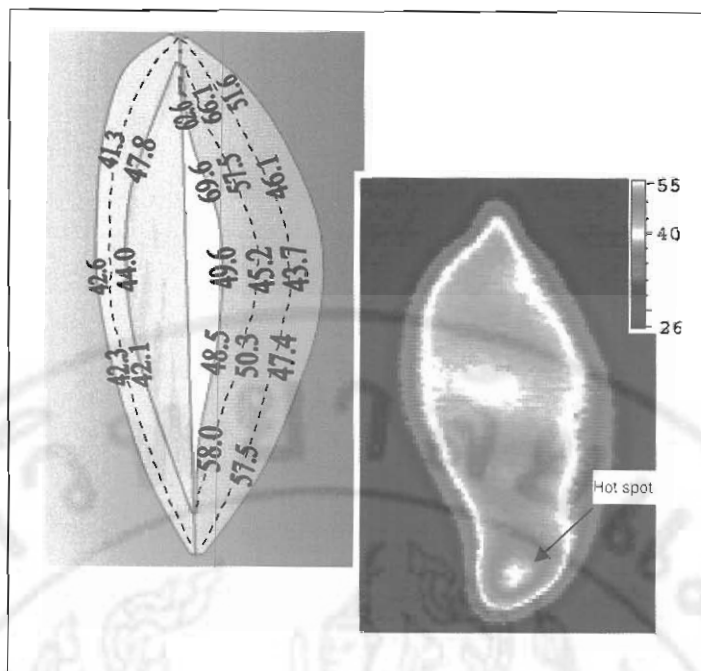
ในส่วนของการทดลองจริง คณะผู้วิจัยได้ใช้มะม่วงโชคอนันต์เนื่องจากหมดฤดูกาลของมะม่วงน้ำดอกไม้แล้ว มะม่วงโชคอนันต์ที่ใช้ ได้จัดซื้อมาจากสวนของเกษตรกร อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่ เมื่อเดือน กรกฎาคม 2546 การทดลองแบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่ 1 ทดลองหาจุดทะลุทะลวง (Penetration depth) ของไมโครเวฟในมะม่วง และส่วนที่ 2 หาการกระจายความร้อนของคลื่นไมโครเวฟในผลมะม่วงที่วางในแนวตั้งและแนวนอน ผลการทดลองพบว่า หากใช้ไมโครเวฟที่ 50% เป็นเวลา 40 วินาที จะทำให้อุณหภูมิภายในมะม่วง ณ ตำแหน่งที่ขีดเมสสิต ร้อนขึ้นถึง 46°C ดังนั้นจึงอนุมานได้ว่า คลื่นไมโครเวฟที่ได้จากการทดลองด้วยตู้อบไมโครเวฟแบบครัวเรือนนี้ สามารถทะลุทะลวง

ได้มากกว่า 20 มม. ในเนื้อมะม่วง ผลการทดลองในส่วนที่ 2 พบว่า มะม่วงที่วางในแนวนอนมีการกระจายตัวของความร้อนที่ดีกว่ามะม่วงวางในแนวตั้ง และความร้อนได้ทะลุวงเข้าไปก้านิดใกล้กับเมล็ด ดังนั้นจุด Cold spot ของมะม่วงที่อบร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจึงปรากฏอยู่ภายนอกใกล้ผิวมะม่วง ซึ่งแตกต่างจากมะม่วงที่อบร้อนด้วยไอน้ำที่จะมีจุด Cold spot อยู่ภายในเนื้อติดเมล็ด เนื่องจากการทดลองในขั้นตอนนี้ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ จึงได้เขียนเป็นบทความทางวิชาการและตีพิมพ์ในวารสาร Transactions of The ASAE (Impact factor 2003 = 0.563) ซึ่งกำลังอยู่ระหว่างการ Review (ดูภาพผนวก ก บทความเรื่อง Effects of microwave power, treatment time and sample orientation on heat distribution in mango)

ในช่วงการวิจัยระยะที่ 2 ช่วงเดือนธันวาคม 2546 – มีนาคม 2547 ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบกับมะม่วงน้ำดอกไม้เกรดคัดส่งออกจากจังหวัดฉะเชิงเทรา ทำการทดลองให้ความร้อนเป็นลำดับขั้น (Step-wised heating) เพื่อหาอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของมะม่วง พบว่าเมื่อไมโครเวฟที่ 50% เวลาในการอบร้อน 80 วินาทีวางในแนวนอน มะม่วงที่จุดหนาวสุด (28 mm จากผิว) มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากกว่า 47°C (ภาพที่ 2) และการกระจายตัวของความร้อนดีกว่าการวางมะม่วงในแนวตั้ง (ภาพที่ 3)

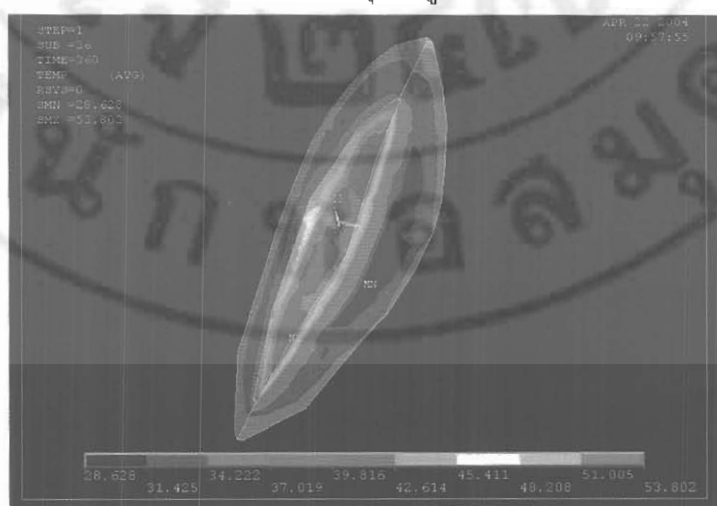


ภาพที่ 2. อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของมะม่วงเมื่ออบร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลังงานต่าง ๆ ในแนวตั้ง (Vertical) และแนวนอน (Horizontal) ด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบเป็นลำดับขั้น



ภาพที่ 3. การกระจายความร้อนในมะม่วงน้ำดอกไม้ และ Thermogram การกระจายความร้อนที่ผิวเมื่ออบร้อนด้วยไมโครเวฟกำลังงาน 50% เป็นเวลา 80 วินาทีในแนวนอน

3. การสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ ผู้วิจัยได้เริ่มดำเนินการไปโดยใช้โปรแกรม Solid work เพื่อเขียนโมเดลของมะม่วง เพื่อทำ Finite element model หาค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ในผลมะม่วงเทียบกับผลการทดลองที่ได้ เนื่องจากโมเดลที่สร้างขึ้นมีข้อจำกัดที่จะต้องให้ข้อมูลเพิ่มเติมจากการทดลองในด้านคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกของมะม่วง ซึ่งอยู่นอกเหนือจากงานวิจัยนี้ ดังนั้นผลการสร้างโมเดลคณิตศาสตร์จึงสำเร็จเพียงแค่การขึ้นรูปโมเดลและการคำนวณเบื้องต้นเท่านั้น ไม่ได้นำมาเป็นส่วนหลักในการวิจัย ตัวอย่างการสร้างโมเดลเพื่อแสดงอุณหภูมิภายในของมะม่วงแสดงดังภาพที่ 4.



ภาพที่ 4. Finite element modeling ของมะม่วงผ่าซีกเพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิภายในเนื้อเมื่ออบร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

4.2 การดำเนินงานวิจัยตามวัตถุประสงค์ 2.2

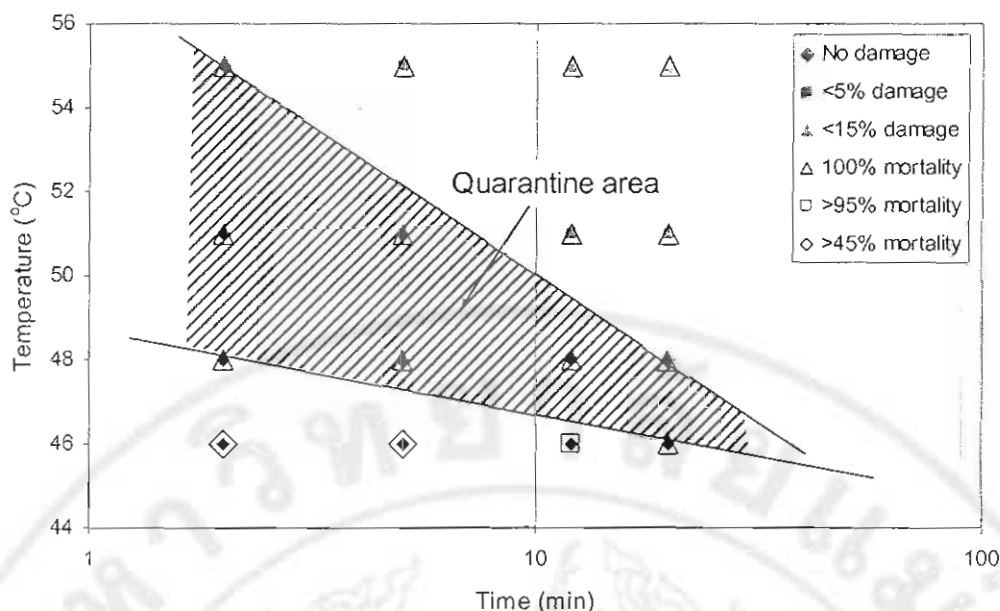
1. การออกแบบและสร้างตู้อบไอน้ำ ระบบไอน้ำที่สร้างขึ้นเป็นการให้ความร้อนด้วย Heater แบบแท่ง ขนาด 2,000 Watts อยู่ทางด้านล่างของตู้ โครงตู้ทำด้วยเหล็กสแตนเลส ผนังเป็นกระจก มีตะแกรงสำหรับวางมะม่วงเพื่อการอบไอน้ำ

2. การทดสอบกำหนดอุณหภูมิและการอบคลื่อนไมโครเวฟร่วมกับอบไอน้ำ คณะผู้วิจัยได้ทำการเพาะหน่อลงในมะม่วง ซึ่ง ผู้ร่วมวิจัย ดร.วราวุฒิ ศิริขจรจารุ ได้ดำเนินการเลี้ยงเพาะหน่อมาตั้งแต่เดือน ธันวาคม 2546 เป็นต้นมา จนสามารถเพาะไผ่หน่อแฉ่งวันทองลงบนมะม่วงให้มีอัตราการพักตัวได้ถึงมากกว่า 95% ซึ่งเป็นระดับความเชื่อมั่นที่เพียงพอที่จะทำการทดลองเพื่อฆ่าหน่อด้วยความร้อนต่อไป

3. ในการทดลองกำจัดไผ่หน่อแฉ่งวันทองด้วยความร้อนปกติในอาหารเลี้ยง (In Vitro) ด้วยวิธีการแช่น้ำร้อน พบว่าอุณหภูมิและเวลาที่สามารถกำจัดไผ่หน่อแฉ่งวันทองได้ คือ 49°C เป็นเวลา 10 นาที หรือ 51°C เป็นเวลา 5 นาที ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้ในการทดลองกำจัดกักกันหน่อแฉ่งวันทองขึ้นสมบูรณ์ต่อไป

4. ในการทดสอบเพาะหน่อแฉ่งวันทองลงในผลมะม่วง (In Vivo) พันธุ์น้ำดอกไม้สีทองและให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับไอน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 47°C เป็นเวลา 20 นาที พบว่ากระบวนการทางความร้อนดังกล่าวกำจัดหน่อได้เพียงประมาณ 75% ส่วนคุณภาพของเนื้อมะม่วงที่ผ่านกระบวนการในข้อที่ 1 ประเมินเฉพาะสี พบว่าสีเนื้อยอมรับได้แต่สีเปลือกยังไม่สามารถยอมรับได้เนื่องจากยังมีส่วนที่เป็น Heat burn อยู่มาก เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านการคัดเลือกขนาด จึงไม่สามารถควบคุมผลการทดลองให้เป็นไปตามที่คาดไว้ ขนาดที่เหมาะสมกับการทดลองนี้ ควรอยู่ระหว่าง 300-350 กรัม/ผล เนื่องจากเป็นมะม่วงนอกฤดู จึงทำให้ขนาดของมะม่วงที่ใช้มีขนาดใหญ่เกินไป (350-400 กรัม/ลูก) และไม่สอดคล้องกับขนาดของไมโครเวฟขนาดครัวเรือนที่ใช้ ได้ในช่วงการวิจัยขั้นตอนนี้ และได้ทำการปรับเปลี่ยนกระบวนการทดลองและควบคุมขนาดของผลมะม่วงที่ใช้ในการทดลองให้เหมาะสมต่อไป

5. ในระยะสุดท้ายของการวิจัย คณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองอบร้อนมะม่วงด้วยไมโครเวฟแล้วตามด้วยไอน้ำเพื่อรักษาอุณหภูมิของผลไม้ให้ได้ตามที่ต้องการในการกำจัดกักกันหน่อแฉ่งวันทอง ส่วนแรกของการทดลอง ได้หาอัตราการตายของหน่อแฉ่งวันทองในอาหารเลี้ยง (In Vitro) ทำซ้ำกับการทดลองในขั้นตอนที่ 4 เพื่อให้แน่ใจถึงผลที่ได้รับให้สอดคล้องกัน ณ อุณหภูมิและเวลาในการอบร้อนเดียวกันนี้ได้ทำการทดลองเพื่อหาคุณภาพมะม่วงด้วย จากนั้นทำการประเมินผลโดยพล็อตเป็นกราฟอัตราการตายของหน่อขึ้นทับกับกราฟคุณภาพของมะม่วง ได้ผลดังภาพที่ 5

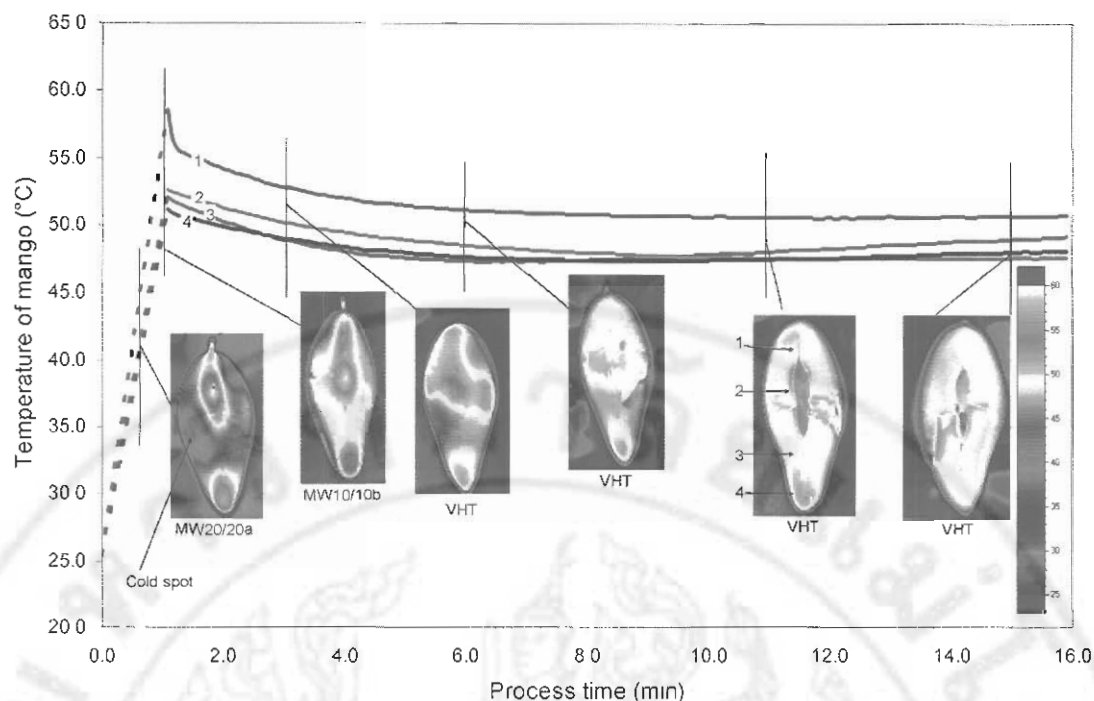


ภาพที่ 5. กราฟอัตราการตายของหนอนแมลงวันทอง ทับซ้อนกับคุณภาพของมะม่วงอบร้อนด้วยการแช่ในน้ำร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ แต่ละจุดคือค่าเฉลี่ยของไซหนอนแมลงวันทอง 200 ฟอง และมะม่วง 8 ลูก

จากภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่า พื้นที่สำหรับการกำจัดกักกันหนอนแมลงวันทองคือพื้นที่แรเงา ซึ่งประกอบไปด้วยขอบเขตของหนอนแมลงวันทองที่มีอัตราการตาย 100% ซ้อนทับกับคุณภาพของผลไม้หลังอบร้อนที่ไม่มีการเสียหายเลย จากผลการทดลองนี้ จึงได้เลือกใช้อุณหภูมิและเวลาในการกำจัดกักกันหนอนแมลงวันทองได้แม่นยำมากขึ้น

4.3 การดำเนินงานวิจัยตามวัตถุประสงค์ 3.3

1. สืบเนื่องจากการดำเนินงานในหัวข้อ 4.2 คณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองอบร้อนมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองขนาด 300-350 กรัม/ลูก ด้วยไมโครเวฟ ตามด้วยอบไอน้ำเพื่อหากระบวนการกำจัดกักกันหนอนแมลงวันทองในมะม่วงให้สมบูรณ์ พบว่า การอบร้อนเริ่มต้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 400 วัตต์ เป็นเวลา 40 วินาที วางตัวในแนวนอน ตามด้วยไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 400 วัตต์ เป็นเวลา 20 วินาที วางตัวใกล้กับท่อ Waveguide ของไมโครเวฟ ทำให้อุณหภูมิภายในโดยเฉลี่ยสูงขึ้นถึง 48-54°C จากนั้นเมื่ออบร้อนด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 55°C เป็นเวลาอีก 2 นาที อุณหภูมิโดยรวมของมะม่วงสูงขึ้นถึง 51-52°C จึงเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเริ่มกำจัดหนอนได้ อุณหภูมิภายในของผลมะม่วงที่เวลาต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6. อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในมะม่วงตามลูกศรชี้ อบร้อนด้วยไมโครเวฟ 400 วัตต์ เป็นเวลา 40 วินาที (MW20/20a) ตามด้วย ไมโครเวฟ 400 วัตต์เป็นเวลา 20 วินาที (MW10/10b) แล้วตามด้วยไอน้ำที่ 55°C เป็นเวลา 12 นาที ระดับอุณหภูมิของมะม่วงในภาพความร้อนสอดคล้องกับแท่งสเกลสีด้านขวามือ

2. เมื่อได้พัฒนากระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟและไอน้ำแก่มะม่วงแล้ว จึงได้เลือกการทดลองอยู่ 3 กระบวนการเพื่อทดสอบยืนยัน (Confirmation test) ทั้งอัตราการตายของหนอน และคุณภาพของมะม่วงที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนดังกล่าว การเลือกกระบวนการให้ความร้อน 3 กระบวนการได้แก่

MVHT1- กระบวนการอบร้อนขั้นต้นใช้ไมโครเวฟ 400 วัตต์ เป็นเวลา 40 วินาที ตามด้วย 400 วัตต์อีก 20 วินาที ต่อด้วยอบด้วยไอน้ำ 55°C เป็นเวลา 18 นาที จากนั้นทำการลดอุณหภูมิด้วยสเปรย์น้ำเย็น 25°C เป็นเวลา 30 นาที กระบวนการนี้คาดว่าจะสามารถฆ่าหนอนได้ 100% และมีอัตราการเสียหายของผลไม้ไม่เกิน 15% สอดคล้องกับภาพที่ 5

MVHT2 - กระบวนการอบร้อนขั้นต้นใช้ไมโครเวฟ 400 วัตต์ เป็นเวลา 40 วินาที ตามด้วย 400 วัตต์อีก 20 วินาที ต่อด้วยอบด้วยไอน้ำ 55°C เป็นเวลา 7 นาที จากนั้นทำการลดอุณหภูมิด้วยสเปรย์น้ำเย็น 25°C เป็นเวลา 30 นาที กระบวนการนี้คาดว่าจะสามารถฆ่าหนอนได้ 100% และไม่มีการเสียหายของผลไม้ สอดคล้องกับภาพที่ 5

VHT47 – กระบวนการอบร้อนขั้นต้นใช้น้ำอุณหภูมิ 55°C เพิ่มอุณหภูมิที่จุดขีดเมล็ดให้ได้ถึง 47°C จากนั้นคงอุณหภูมิไว้อีก 18 นาที แล้วทำการลดอุณหภูมิด้วยสเปรย์น้ำเย็น 25°C เป็นเวลา 30 นาที กระบวนการนี้คาดว่าจะสามารถฆ่าหนอนแมลงวันทองได้ 90% สอดคล้องกับรายงานของ Jang (1986)

ตารางที่ 1. อัตราการตายของหนอนแมลงวันทองระยะไข่ และอัตราการเสียหายของผลไม้เนื่องจากความร้อนด้วยการอบร้อนวิธีต่าง ๆ

วิธีการ	อัตราการตาย (%)	ผลไม้เสียหาย (%)		ลักษณะที่สังเกตได้
		ภายนอก	ภายใน	
MVHT1	100	15.2	11.4	เกิดผิวสีน้ำตาลเข้ม ภายในมีเนื้อไส้ลัมขาวที่ขั้วและปลายลูกแต่จำกัดไม่ลูกกลมเสียหายไปเนื้อที่ข้างเคียง
MVHT2	100	0	1.1	ผิวปกติไม่มีรอยขีด มีเนื้อไส้ลัมสีขาวเล็กน้อยที่ปลายเมล็ดแต่จำกัดไม่ลูกกลมเสียหายไปเนื้อที่ข้างเคียง
VHT47	96.2	16.2	8.2	เกิดผิวสีน้ำตาลเข้ม ภายในมีเนื้อไส้ลัมขาวที่ขั้วและปลายลูกและลูกกลมเสียหายไปเนื้อที่ข้างเคียง

ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า การใช้กระบวนการอบร้อนด้วย MVHT2 ที่เป็นกระบวนการร่วมระหว่างไมโครเวฟและไอน้ำเป็นวิธีการที่ดีที่สุดในการกำจัดกักกันหนอนแมลงวันทองในมะม่วง ให้ผลของอัตราการตายของหนอนแมลงวันทอง 100% โดยที่ไม่ปรากฏรอยขีดเนื่องจากความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวแต่มีการเสียหายของเนื้อมะม่วงเล็กน้อย (1.1%) เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบด้วยไอน้ำปกติ VHT47 แล้วจะพบว่า MVHT2 มีอัตราการเสียหายของผลไม้ที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการอบร้อนมะม่วงระหว่างกระบวนการ MVHT2 และ VHT47 แล้ว พบว่า MVHT2 ใช้ระยะเวลารวมตลอดกระบวนการสั้นกว่า VHT47 ถึง ในด้านคุณภาพของมะม่วงนั้น เมื่อเก็บมะม่วงไว้ที่อุณหภูมิ 13°C เป็นเวลา 13 วัน มะม่วงที่ผ่านการอบร้อนด้วยกระบวนการทั้ง 3 แบบและมะม่วงสดที่ไม่ผ่านกระบวนการอบร้อน มีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ความแน่นเนื้อ สี °Brix และปริมาณกรดที่ใดเตรทได้ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) แสดงให้เห็นว่า การอบร้อนมะม่วงไม่ว่าจะเป็นวิธีการใด ๆ ในงานวิจัยนี้ไม่มีผลต่อการสุกของมะม่วง (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากผนวก ข บทความเรื่อง Microwave-Vapor Heating Technique for Mango Quarantine Treatment: Oriental Fruit Fly Mortality and Fruit Quality)

5. สรุปผลการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้พัฒนาแนวทางการอบร้อนมะม่วงด้วยไมโครเวฟเพื่อการกำจัดกักกันหนอนแมลงวันทองเพื่อการส่งออก เนื่องจากการอบร้อนด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวไม่สามารถคงอุณหภูมิเนื้อภายในให้คงที่ได้ จึงต้องมีการอบร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับไอน้ำเพื่อคงอุณหภูมิให้ได้ตามที่ต้องการ มะม่วงที่ทดลองให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟทั้งสองพันธุ์ คือโชคอนันต์และน้ำดอกไม้สีทอง ขนาด 300-350 กรัม/ผล มีอัตราการเพิ่มของความอุณหภูมิเนื้อภายในให้ได้ประมาณ $46-51^{\circ}\text{C}$ ด้วยระยะเวลาไม่เกิน 1 นาที จึงอาจอนุมานได้ว่าค่าสมบัติทางไดอิเล็กตริกของมะม่วงทั้งสองชนิดนั้นใกล้เคียงกัน และการลดระยะเวลาอบร้อนนั้นเป็นข้อได้เปรียบอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การให้ความร้อนด้วยไอน้ำแบบปกติ ซึ่งใช้ระยะเวลาไม่น้อยกว่า 30 นาที เมื่อพัฒนากระบวนการกำจัดกักกันหนอนแมลงวันทองได้สมบูรณ์แล้ว พบว่า การใช้ไมโครเวฟเพื่อเพิ่มอุณหภูมิในขั้นต้น แล้วตามด้วยการอบไอน้ำเพื่อคงอุณหภูมิมะม่วงไว้จากนั้นจึงลดอุณหภูมิด้วยน้ำเย็น เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพดี สามารถลดระยะเวลาการอบร้อนทั้งกระบวนการเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบด้วยไอน้ำปกติได้มากกว่า 90% ในช่วงการให้ความร้อนขั้นต้น (Come-up period) และกำจัดหนอนได้ 100% โดยที่ไม่ทำให้คุณภาพมะม่วงเปลี่ยนแปลง โครงการวิจัยนี้เป็นพื้นฐานที่แสดงให้เห็นถึงเทคโนโลยีที่ใช้ซึ่งสามารถนำไปขยายผลสู่ระดับอุตสาหกรรมได้ ถึงแม้ว่ายังมีจุดอ่อนในด้านการ Overheat เป็นบางจุดในเนื้อมะม่วงเนื่องจากการรวมศูนย์ของไมโครเวฟ แต่หากมีการศึกษาเชิงลึกมากขึ้นถึงลักษณะของสนามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการออกแบบระบบที่ทำให้การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟสม่ำเสมอ ก็จะสามารถลดข้อจำกัดดังกล่าวลงได้ในอนาคต

6. Output ที่ได้จากโครงการ

ได้บทความวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ 2 เรื่อง ได้แก่

1. Varith, J. and T. Kiatsiriroat, 2005. Effects of Microwave Power, Treatment Time and Sample Orientation on Heat Distribution in Mango. *Transaction of the ASABE*. In review. Impact factor 2003 = 0.563
2. Varith, J., W. Sirikajornjaru, and T. Kiatsiriroat 2005. Microwave-Vapor Heating Technique for Mango Quarantine Treatment: Insect Mortality and Fruit Quality. *Postharvest Biology and Technology*. In review. Impact factor 2004 = 1.714

ได้นำเสนอผลงานทางวิชาการในต่างประเทศ 1 ครั้ง ณ การประชุมวิชาการนานาชาติ The 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting. Ottawa, Ontario, Canada. วันที่ 1 - 4 August 2004. ในหัวข้อ Effects of Microwave Power, Treatment Time and Sample Orientation on Heat Distribution in Mango. 2004. Paper # 046104. โดย Varith, J., and T. Kiatsiriroat.

7. เอกสารอ้างอิง

- ..., การอบไอน้ำมะม่วงส่งออกญี่ปุ่น. เอกสารเผยแพร่. ศูนย์พัฒนาการผลิตและควบคุมศัตรูผักผลไม้
เพื่อการส่งออกที่ 1 จังหวัดเชียงใหม่
- สรุชา สิทธิชัย. 2545. มะม่วงโลกที่บราซิล. *สาระไม้ผลและผัก*. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
7(6): 8-10.
- Decareau, R. V. 1992. Fundamentals of microwave heating. In *Microwave Foods: New Product Development*. Food & Nutrition Press, Inc. Trumbull, CT. USA.
- Feng, H. 2000. Microwave drying of particulate foods in a spouted bed. Ph.D. Dissertation.
Washington State University, Pullman, WA. USA.
- Ikediala J.N., Hansen, J.D., Tang J., Drake, S.R. and Wang S. 2002. Development of a saline
water immersion technique with RF energy as a postharvest treatment against codling
moth in cherries. *Postharvest Biol. and Technol.* 22: 209-221.
- Jang, E.B., 1986. Kinetics of thermal death in eggs and first instars of three species of fruit
flies (Diptera: Tephritidae). *J. Econ. Entomol.* 79, 700-705.
- Karabulut, O.A. and Baykal N. 2002. Evaluation of the use of microwave power for the
control of postharvest diseases of peaches. Research Note. *Postharvest Biol. and Technol.* 26: 237-240.
- Singh, R.P. and Heldman, D.R. 1993. Heat transfer in food processing. In *Introduction to Food Engineering*, 2nd ed. Academic Press, Inc., New York.
- Stuchly, S. S. and Stuchly, M. A. 1983. Microwave drying: potential and limitations. In
Advances in Drying, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 2, pp. 53-71.

ภาคผนวก ก.
บทความวิชาการที่ 1

Varith, J. and T. Kiatsiriroat, 2005. Effects of Microwave Power, Treatment Time and Sample Orientation on Heat Distribution in Mango. *Transaction of the ASABE*. In review. Impact factor 2003 = 0.563

THIS PAGE IS FOR INDEXING PURPOSES AND WILL NOT BE PRINTED

Before using the template, make sure that Word's AutoFormat features are all off

(select AutoFormat from the pulldown Format menu).

For additional detail please see the ASAE Guide for Authors at

<http://www.asae.org/pubs/authguide.html>

Author(s)

First Name	Middle Name	Surname	Role	Type (Corresp)
Jatuphong	-	Varith	ASABE member-1007721 Assistant Professor	Y

Affiliation

Organization	URL	Email
Dept. of Agricultural and Food Engineering, Maejo University, Chiang Mai, Thailand 50290 Tel +66-53-878-123; Fax +66-53-498-902	www.engineer.mju.ac.th	jatuphon@mju.ac.th

Author(s)

First Name	Middle Name	Surname	Role	Type (Corresp)
Tanongkiet	-	Kiatsiriroat	Non-ASABE member; Professor	N

Affiliation

Organization	URL	Email
Dept. of Mechanical Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, 50200		tanong@dome.eng.cmu.ac.th

1 EFFECTS OF MICROWAVE POWER, TREATMENT TIME AND SAMPLE 2 ORIENTATION ON HEAT DISTRIBUTION IN MANGO

3 J. Varith, T. Kiatsiriroat

4 The authors are Jatuphong Varith, ASAE Member Engineer, assistant professor, Department of Agricultural and Food
5 Engineering, Meajo University, Chiang Mai, Thailand, and Tanongkiat Kiatsiriroat, Non-ASAE Member Engineer,
6 Professor, Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand. Corresponding author: J
7 Varith, Department of Agricultural and Food Engineering, Meajo University, Chiang Mai, 50290, Thailand.; phone: +66-53-
8 878-123, fax +66-53-498-902, e-mail jatuphon@mju.ac.th

9 **ABSTRACT.** Quarantine heat treatment to disinfest oriental fruit fly (*Dacus dorsalis* H.) in mangoes
10 (*Mangifera indica* L.) is necessary for fruits exported to developed countries. Microwave provides rapid heating
11 in food materials which may shorten the fruit quarantine process. The objectives of this work were to
12 preliminarily assess heat penetration of microwave in mango and to determine the optimal condition to obtain
13 uniform heating in mango. A 800 W microwave oven was used to provide heating on export-graded 'Chokanan'
14 mango (weight of 320 g/fruit). Experiments were conducted to investigate factors including microwave power,
15 heating time, and sample orientation affecting heat penetration and heat distribution in mango. Internal
16 temperature mapping of the mango was obtained to assess heat distribution inside the fruit along with
17 thermogram to illustrate its surface temperature. It was found that mango heated with microwave power of 50%
18 for 40 s yielded an internal temperature of 45 °C at 23 mm underneath the skin where the flesh was thickest and
19 susceptible to the slowest heating. With the aforementioned condition, mango treated with microwave in the
20 horizontal position provided better heating uniformity than did in the vertical one. Microwave heat treatment on
21 mangoes may offer advantages over the standard vapor heat treatment (VHT) during come-up time, in terms of
22 less energy consumption, easier implementation for a continuous system, and possibly better product quality
23 retention due to shorter come-up heating time.

24 **Keywords.** Mango, Microwave, Quarantine treatment, Oriental fruit fly, Thermogram.

25 INTRODUCTION

26 Mango (*Mangifera indica* L.) is one of the most important agricultural products of Thailand
27 which shows a great potential for export. In 2001, Thailand produced 1.25 million tons of mango;

28 however, only about 3-5 thousand tons of which were exported to foreign countries (Sithichai, 2002)
29 where the remaining was consumed domestically. In order to export mango to some developed
30 countries such as Japan, the United States and Australia, quarantine treatment to disinfect oriental fruit
31 fly (*Dacus dorsalis* H.) is required. The common method used to control fruit fly in mangoes is by
32 vapor heat treatment (VHT). Unahawutti et al. (1993) reported that heat tolerance of oriental fruit fly
33 first instars to VHT for 'Nam Dokmai' mango was 46.5°C with holding time of 5 min. With this
34 condition 100% of the oriental fruit fly first instars can be killed. Even though VHT are accepted for
35 current quarantine treatment, its slow come-up heating time is a drawback and limit the efficiency of
36 productivity. For example, Nam Dokmai mango required more than 100 min to increase its center
37 temperature to 46.5°C with VHT (Unahawutti et al., 1993). Thus, alternative process to reduce
38 treatment time of mango quarantine treatment could be a challenge. X-ray (Thayer, 1990) and electron
39 beam (Drake and Neven, 1997) are alternative technologies for fruit-exporting pest control but they are
40 still in the stage of industrial implementation for mango industry in Thailand (Suthumchai and
41 Chunjirakul, 2003). Since both technologies are non-thermal processes, they may offer advantages
42 over heat treatment in terms of product quality retention and possibly short treatment time. However,
43 the associated high costs of investment and maintenance may reduce its viability for commercial
44 production.

45 Microwave (MW) heating is an alternative to VHT that may be used to control fruit fly in mango.
46 MW provides rapid heating to food materials by rotating back and forth the polar molecules (e.g.,
47 water) inside the food more than million times per second. With such extreme rotation, kinetic energy
48 is transformed into heat (Buefler, 1993). Ikediala et al. (1999) applied a 915 MHz MW heating to study
49 pest control in cherries and found that mortality rate of codling moth ranged from 39 to 98%. They
50 suggested that MW energy may provide an alternative non-chemical quarantine treatment in cherries
51 but further study is needed to optimize the treatment protocol for insect control and fruit quality.
52 Karabulut and Baykal (2002) applied the 2,450 MHz household MW to heat the peaches inoculated

53 with *Botrytis cinerea* and *Penicillium expansum*. After being heated for 2 minutes, rate of infection on
 54 peaches was significantly less than the control. MW treatment did not deteriorate the firmness of peach
 55 samples nor cause cracking on skin as well

56 There are two major issues concerning MW heating on food materials; heat penetration and heat
 57 uniformity of MW in food stuffs (Ryynänen, 2002). Heat penetration of MW in food depends on
 58 geometry, structure, and electromagnetic properties of foods called dielectric constant (ϵ') and
 59 dielectric loss factor (ϵ''). One of the most important characteristics of MW heat penetration is
 60 penetration depth (d_p), which is defined as "the depth below a large plane surface of a substance at
 61 which the power density of a perpendicularly impinging, forward propagating plane electromagnetic
 62 wave has decayed by 1/e from the surface value (1/e \approx 37%)" (Ryynänen, 1995). If ϵ''/ϵ' is smaller than
 63 about 0.5, d_p can be calculated as a function of ϵ' and ϵ'' as follow:

$$64 \quad d_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{\epsilon'}}{2\pi\epsilon''} \quad [1]$$

65 where λ_0 is free space microwave wavelength (for 2,450 MHz, $\lambda_0=122$ mm). It was reported that
 66 d_p of fruits and vegetables are normally between 10-15 mm (Buffler and Stanford, 1991). Venkatesh
 67 and Raghavan (2004) reported that ϵ' and ϵ'' of mango were 61 and 14, respectively. With these
 68 values, d_p of mango can be calculated using Eq. 1 and found to be 10.8 mm. Therefore, question arises
 69 whether or not MW can penetrate and be converted into heat at the thickest part of mango (\approx 20-25 mm
 70 at the cheek) to implement the oriental fruit fly quarantine heat treatment. On the other hand, MW is
 71 known for its non-uniform heating. Different design of MW cavity significantly affects pattern of MW
 72 distribution and heat absorption in food stuffs. Also different dielectric properties of food components
 73 and their dispersion inside the food as well as position and geometry of the food sample inside the MW
 74 cavity greatly influence local heat absorption and heat distribution in food sample. The complex factors
 75 affecting the non-uniform heat absorption and heat distribution was documented in van der Veen
 76 (2004).

The objectives of this work were to assess heat penetration and to determine the optimal condition to obtain a relatively uniform heating in mango as a preliminary study for fruit export quarantine treatment. Success on this work can lead to further development of MW quarantine treatment combining with VHT to improve heating efficiency and reduce treatment time for mango exporting quarantine process.

MATERIALS AND METHODS

MATERIALS

Export-graded 'Chokanan' mango harvested from local orchard in Chiang Mai, Thailand, was used in this experiment. Samples were stored at 13°C/80%RH in refrigerator for 2-3 days prior to this study. Maturity of mango was 75% (commercially estimated), following guideline of VHT for mango export according to Agriculture Regulatory Division, Department of Agriculture, Thailand. Before the testing, the mangoes were stored in ambient condition (25°C/70%RH) for 5 hours to warm up the fruit. Basic physical properties of mango were measured and presented in Table 1.

Table 1. Basic thermo-physical properties of Chokanan mango (flesh) used in MW heating experiment.

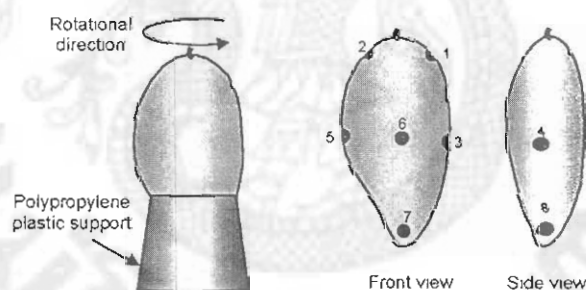
Physical Properties	Value	Unit	Measuring device / method
Fruit mass (50 samples)	320±31	g	0.01g precision balance
Density	1.09±0.01	$\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	Mass / volume
Firmness	32.69±0.72	N/m	45° conical hand penetrometer
Titratable acidity	0.171±0.012	%	Indicator method
Thermal conductivity	0.527±0.011	W/m·°C	Line-heat source probe
Specific heat	3.748±0.217	kJ/kg·°C	Differential scanning calorimetry

Note: Means of 5 measurements with standard deviations or as indicated.

EFFECT OF MW POWER AND TREATMENT TIME ON HEAT PENETRATION

Since electromagnetic field inside the household MW cavity was in 3-dimensional direction, it is, in this experiment, too complex to evaluate heat penetration using the theoretical d_p defined by Rynnänen (1995). Therefore, heat penetration was evaluated from heat concentrated inside mango

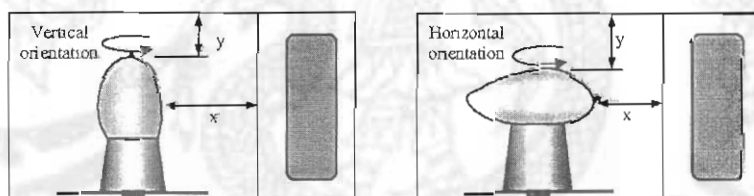
97 which can be measured by thermocouples after MW heating. The aim of this experiment was to
 98 achieve an internal temperature of mango closest to the pit (approximately 20-25 mm underneath the
 99 skin) to approximately 47°C, which was the effective temperature to disinfest the fruit fly larvae.
 100 Experiment was conducted by treating the mango with a 800 W-household MW oven (2,450 MHz)
 101 under the combination of MW power and heating time. MW power was regulated for 2 levels, 50 and
 102 100%, while heating time was designated for 2 intervals, 20 and 40 s. Each treatment was replicated 3
 103 times. During treatment, the mango was positioned vertically on a polypropylene support and rotated
 104 along stem-apex axis (Figure 1). Immediately after each treatment, temperature of mango closest to the
 105 pit was measured in ambient condition (25°C/70%RH) using thermocouple probe type T (more details
 106 of temperature measurement apparatus are discussed further). Thermocouple probes were intruded
 107 toward the pit at the cheek of mango (at point 6 in Fig. 1). Then temperature measurement was carried
 108 out for 5 min. Average temperature profiles were plotted and compared for each condition. Treatment
 109 that brought about the internal temperature of mango closed to 47°C was selected for further heat
 110 distribution study.



111
 112 Figure 1. Rotational direction of vertical positioning mango treated with 2,450 MHz MW. Number indicates
 113 location on fruit where temperatures were measured.

114 EFFECT OF SAMPLE ORIENTATION ON HEAT DISTRIBUTION

115 A condition of heating power and treatment time that yielded the internal temperature of mango
 116 closest to 47°C from heat penetration study was selected for the study of heating uniformity. For each
 117 treatment, mango was positioned in either horizontal or vertical orientation (Fig. 2) and rotated while
 118 being MW heated. For treatment with horizontal position, mango was additionally rotated along its
 119 stem-apex axis manually due to the lack of rotating mechanism around x-axis. This manual rotation
 120 was carried out by pausing the MW oven at half-time during each treatment, turning the sample over
 121 and restarting heating until finished. After each treatment, temperature profiles at 8 locations and 3
 122 different depths underneath the skin were quickly acquired (10, 20 mm and at the pit ≈ 22.6 mm). For
 123 each measurement depth, experiment was triplicated. Internal temperature of the mango was mapped
 124 into a 3-D model with layers of temperature to demonstrate heat distribution at different depth inside
 125 the mango. Moreover, thermal images of treated mango were acquired using thermal scanning camera
 126 model IR Snapshot™ (Infrared Solutions, Inc. Plymouth, MN, USA) to accompany heat distribution
 127 pattern at the skin with internal temperatures of the mango.



128
 129 Figure 2. Positions of sample orientation and tri-axial distances between sample and cavity wall inside MW
 130 oven. The z-axis (not shown in the figure) was the inward distance between mango and cavity wall.

131 TEMPERATURE MEASUREMENT APPARATUS

132 Temperature measurement apparatus consisted of 8 custom-made temperature probes, a
 133 datalogger and a personal computer. Each temperature probe of 30 mm in length was assembled from a
 134 stainless steel needle gage 15, soldering tip with fine gage thermocouple type T (Omega Engineer Inc.,

135 Stamford, CT, USA), and filled with heat conductive paste. Temperature probes were connected to a
 136 datalogger model AI210 (Wisco, Co. Ltd, Bangkok, Thailand). Data were logged through a serial port
 137 into a personal computer using data acquisition software. Temperature measurement apparatus was
 138 calibrated with a certified mercury thermometer in a water bath. Accuracy of temperature measurement
 139 apparatus was found to be $\pm 0.5^\circ\text{C}$ within a range of $0-60^\circ\text{C}$ (error less than 1%). It should be
 140 mentioned that all temperature measurements on MW-treated mangoes were performed quickly after
 141 the MW treatment. An in-placed temperature measurement during MW heating is possible via optic
 142 fiber temperature sensor without sample rotation; however, the equipment was not available during the
 143 course of our experiment and also did not match with the measurement configuration undergoing the
 144 rotation. Even though the post-treatment temperature measurement provided less accuracy, it provided
 145 all needs to evaluate the temperature history for to accomplish our desired temperature.

146 RESULTS

147 EFFECT OF MW POWER AND TREATMENT TIME ON HEAT PENETRATION

148 Internal temperatures of the mango at 22.6 mm underneath the cheek (point 6 in Figure 1)
 149 reached 35.7 ± 0.7 , 37.4 ± 0.6 , 45.1 ± 0.6 , and $52.3 \pm 1.7^\circ\text{C}$ after the MW treatment with power of 50 and
 150 100% for 20 and 40 s (Fig. 3). After 5 min of temperature measurement in ambient condition, internal
 151 temperature of the mango started to decay due to heat conduction, possibly outward to the skin. Since
 152 MW treatment with 50% power for 40 s increased internal temperature of the mango to 45.1°C
 153 (approaching target temperature of 47°C equivalent to effective temperature by VHT quarantine
 154 treatment), this treatment was selected for further heat distribution study. It should be noted that the lag
 155 time for temperature probe setup on mango was approximately about 60 s. During this lag time, actual
 156 temperature of mango was not known but can be estimated by 2nd polynomial model as follow:

$$157 \quad Y = a \bullet X^2 + b \bullet X + c \quad [2]$$

where Y is predicted temperature; X is time; and a , b , and c are constants from curve fitting. Even though the actual temperature history during the time of -120 to 0 s (period of MW heating plus setup lag time) was not accurately measurable, it may be of less interest than the information obtained after the actual measurement began ($t \geq 0$ sec).

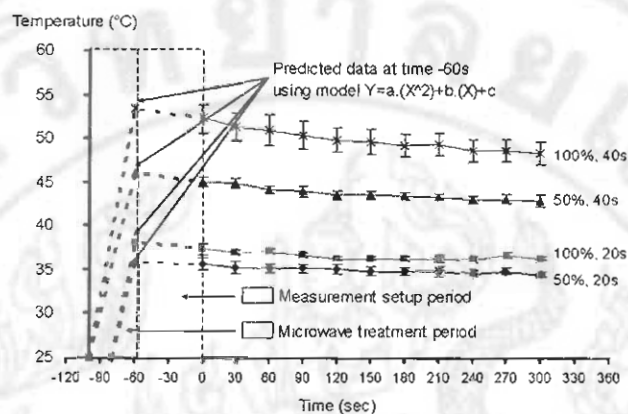
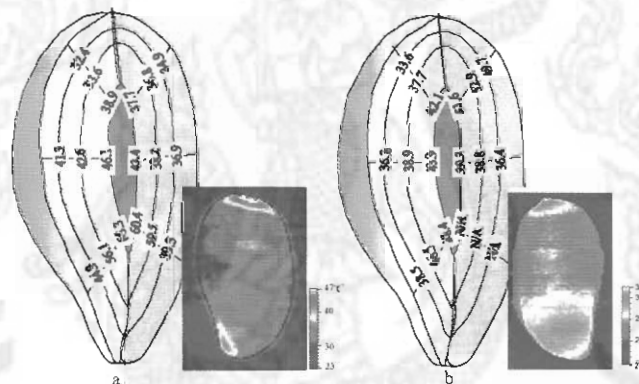


Figure 3. Internal temperature of mangoes closest to the pit (approximately 22.6 mm beneath the skin) after being treated with MW power of 50 and 100 % for 40 and 20 s. Each point represents a mean of 3 replications with error bars of 95% confident interval. The predictive model yields the r^2 of 0.93.

EFFECT OF SAMPLE ORIENTATION ON HEAT DISTRIBUTION

Figure 4 shows general trend of temperature distribution inside the mango and at its surface. The temperature of inside layer was hotter than the outer layer. With MW power of 50% treated for 40 s where mango was in vertical position (Fig. 4a), temperature distribution was not uniform. Heat from MW energy concentrated more at the areas near stem and apex than other parts. On the other hand, horizontal positioning mango (Fig. 4b) showed better heating uniformity with more consistent temperature pattern in each layer than did in vertical positioning one. Internal temperature of horizontal positioning mango distributed from the higher temperature near the pit to the lower temperature toward the skin. Thermogram also indicates that surface temperature of treated mango was more uniform in

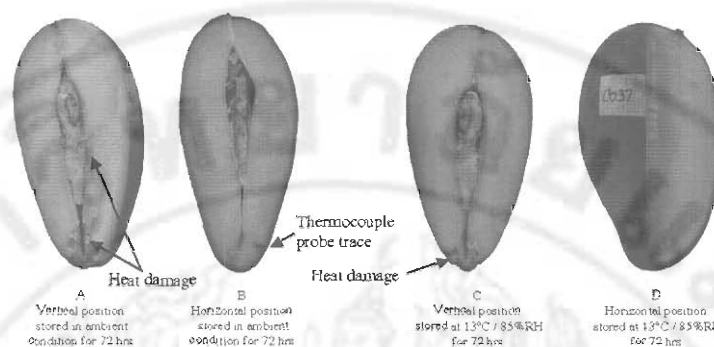
175 horizontal positioning mango than did in vertical positioning mango. Surface temperature of horizontal
176 positioning mango varied within 7°C while that of vertical positioning mango varied up to 24°C, as
177 shown in the associated color scale in each thermogram. This result confirms that orientation of the
178 sample inside MW cavity significantly affected local heat absorption of treated mango. It seemed that
179 electromagnetic field of MW inside oven cavity may be more intense near the top and the bottom parts
180 of MW cavity wall than at the center so that stem and apex areas absorbed more heat than did in cheek
181 area for the vertical positioning mango. For horizontal positioning mango, stem and apex areas were
182 subjected to less MW intensity field because they were oriented away from the top and the bottom
183 parts cavity wall. This resulted in the more even heat distribution in horizontal positioning mango than
184 did in vertical one.



185
186 **Figure 4.** Sectional view of internal and surface temperature distributions of (a.) vertical and (b.) horizontal
187 positioning mangoes treated with MW using 50 % power for 40 sec. Each numeric temperature in the profile
188 represents a mean of 3 measurements. Color of thermogram is coded in degree Celsius using color-scaled bar. N/A
189 refers to not available data due to experimental error.

190
191 After mangoes were treated with MW under different conditions, half of them was stored at
192 ambient condition (25°C/70%RH) while the other half was at 13°C/80%RH refrigerator for 72 hours
193 before visual inspection. For vertical positioning treatment, mangoes stored at both conditions

194 developed heat damages at stem and apex areas where heat were excessively absorbed (Fig. 5). For
 195 horizontal positioning treatment, no damage was observed in mangoes after storing at both conditions.



196
 197 **Figure 5. Visual appearances of MW-treated mango with 50% power for 40 s stored at ambient condition**
 198 **(25°C/70% RH) and in 13°C/85% RH refrigerator for 72 h. No heat damage was observed with horizontal positioning**
 199 **treatment.**

200 DISCUSSION

201 MW energy in this experiment provided heat penetration through the depth of 23 mm inside
 202 mango, sufficiently to generate the desired internal temperature close to 47°C. As Fig. 4 illustrates,
 203 temperature of the inner layer is higher than of the outer one. Therefore, it seems that penetration depth
 204 of this MW configuration exceeds the theoretical value of 10.8 mm, possibly deeper than 23 mm. This
 205 phenomenon may be a consequence of MW focusing effect which is promising for the sample in
 206 spherical and cylindrical geometries. Spherically and cylindrically foods tend to concentrated MW
 207 energy at center when diameter is in the range of 20-60 mm as shown in Fig. 6 (Ducureau, 1992).
 208 Therefore, as MW energy propagated through mango, it focused at the center, causing d_p in this
 209 experiment possibly deeper than 23 mm.

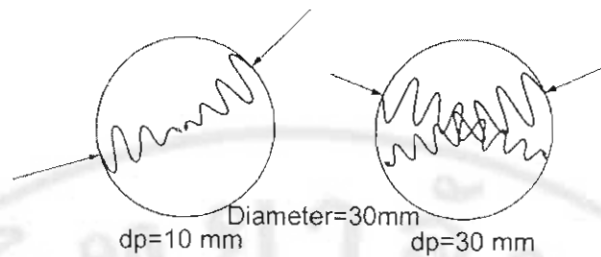


Figure 6. Focusing effect in spherical and cylindrical foods. Adapted from Buffler (1995).

Besides the focusing effect found in this work, it is possible to evaluate electric field intensity using the results from heat penetration study. An increase in temperature of a material due to dielectric heating can be calculated from (Wang et al., 2003):

$$\rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = 5.563 \times 10^{-11} f E^2 \epsilon'' \quad [3]$$

where: C_p is specific heat of material in J/kg-°C, ρ is density of material in kg/m³, E is electric field intensity in V/m, f is frequency (2,450,000 for household MW oven) in Hz, ΔT is temperature rise in material in °C, and Δt is treatment time in s. Using thermo-physical properties of the mango in Table 1 and temperature rise from heat penetration study (Fig. 3), together with ϵ'' of 14 from the literature (Venkatesh and Raghavan, 2004), the E can be calculated. Table 2 shows that E s at the center of MW cavity for 50% and 100% MW power were 1,054 and 1,180 V/m, respectively. One should take into account that these numbers are not absolute since on-line temperature measurement was not available. However, it clearly illustrates that the higher the MW power, the greater the MW field strength, regardless of treatment time.

Table 2. Estimated electric field intensity at the center of MW oven cavity interacting with Chokanan mango.

MW power (%)	Treatment time (s)	Temperature rise (°C)	E_0 (V/m)
50	20	10.7	1,070
50	40	20.1	1,037
		Average	1,054
100	20	12.4	1,152
100	40	27.3	1,209
		Average	1,180

Conclusion

MW treatment with power of 50% increased internal temperature of mango from 25°C to about 45°C within 40 s. Orientation of the sample inside MW cavity greatly affected the local heat absorption in mango where the closer distance from fruit to cavity wall was subjected to the higher heat absorption. Mango whose stem-apex axis positioned horizontally (more distance from the wall to the fruit) absorbed heat more uniformly than that positioned vertically. MW energy penetrated into mango (at least 23 mm) and was converted into heat, which later diffused outward to the skin. Therefore, the cold spot of the mango treated with MW was observed at the outer layer of fruit, which is opposite to those treated with VHT where cold spot is found near the pit inside mango. MW heating can overcome the slow come-up time of VHT (40 s by MW versus 100 min by VHT) and may be either a stand-alone process or a combined process with VHT to improve quarantine heat treatment efficiency. Further work may also be directed toward the design of MW cavity suitable for mango, quality evaluation of mango after MW treatment (e.g., sensory evaluation, firmness, nutrition degradation and ripening process) and completed process protocol of MW-based oriental fruit fly quarantine treatment.

247 **ACKNOWLEDGEMENT**

248 The authors gratefully acknowledge the Thailand Research Fund and the Academic Supporting
249 Fund of the Faculty of Engineering and Agro-industry, Maejo University, for financial support on this
250 research project.

251

252 **REFERENCES**

- 253 Buffler, C.R. 1993. Microwave Cooking and Processing: Engineering Fundamentals for the Food
254 Scientist. An AVI Book, New York, N.Y.
- 255 Buffler, C.R. and M.A. Stanford. 1991. Effects of dielectric and thermal properties on the microwave
256 heating of foods. Microwave World. 12, 15-23.
- 257 Drake, S.R. and L.G. Neven. 1997. Quality response of 'Bing' and 'Rainier' sweet cherries to low dose
258 electron beam irradiation. J Food Proc. Pres. 21, 345-351.
- 259 Ikediala, J.N., J. Tang, L.G. Neven, and S.R. Drake. 1999. Quarantine treatment of cherries using 915
260 MHz microwaves: temperature mapping, codling moth mortality and fruit quality.
261 Postharvest Biol. Technol. 16, 127-137.
- 262 Karabulut, O.A. and N. Baykal. 2002. Evaluation of the use of microwave power for the control of
263 postharvest diseases of peaches. Research Note: Postharvest Biol. Technol. 26, 237-240.
- 264 Ryyänen, S. 1995. The Electromagnetic Properties of Food Materials: A Review of the Basic
265 Principles. J. Food Eng. 26, 409-429.
- 266 Ryyänen, S. 2002. Microwave heating uniformity of multicomponent prepared foods. Academic diss.:
267 EKT series 1260. University of Helsinki, Department of Food Technology. Finland.
- 268 Sithichai, S. 2002. Mango world at Brazil. Thailand Research Fund: The Fruit and Vegetable
269 Newsletter. 7, 8-10. (in Thai).

- 270 Suthumchai, V. and K. Chunjirakul. 2003. Electron beam and X-ray technologies for agricultural
271 product export. Thailand Research Fund: The Fruit and Vegetable Newsletter. 8, 9-12. (in
272 Thai).
- 273 Thayer, D.W.1990. Food irradiation: benefits and concerns. *J Food Qual.* 13, 147-169.
- 274 Unahawutti, U., M. Poomthong, R. Intrarakumheng, W. Worawisithumrong, and P. Srisook. 1993.
275 Heat tolerance of first instar oriental fruit fly infested in 'Nang Klarnngwan', 'Nam Dorkmai',
276 'Rad' and 'Pimsen Daeng' Mangoes. *Thai Agri. Res. J.* 11, 133-147.
- 277 van der Veen, M.E., A.J. van der Goot, C.A. Vriezinga, J.W.G. De Meester, and R.M. Boom. 2004. On
278 the potential of uneven heating in heterogeneous food media with dielectric heating. *J. Food*
279 *Eng.* 63, 403-412.
- 280 Venkatesh, M.S. and G S.V. Raghavan. 2004. An overview of microwave processing and dielectric
281 properties of agri-food materials. *Biosys. Eng.* 88, 1-8.
- 282 Wang, S., J. Tang, J.A. Johnson, E. Micham, J.D. Hensen, G. Hallman, S.R. Drake, Y. Wang. 2003.
283 Dielectric properties of fruits and insect pests as related to radio frequency and microwave
284 treatments. *Biosys. Eng.* 85, 201-212.

Now—Submit your journal manuscript online at
<http://asaejournals.manuscriptcentral.com/>

ASABE Copyright Transfer and Page Charge Agreement

Please complete this form and return it to ASABE. You may:

- Add your electronic signature, or scan the signed form, and then upload it at asaejournals.manuscriptcentral.com in the same way you submit your manuscript or send it as an e-mail attachment to vander@asabe.org, or
- Print, sign, and fax it to 269-429-3852 or mail it to ASABE Manuscript Coordinator, 2950 Niles Rd., St Joseph, MI 49085-9659 USA.

Corresponding Author's Name Jatuphong Varith

Manuscript Title Effects of microwave power, treatment time and sample orientation on heat distribution in mango

Manuscript ID number, if known (sent to you at submission) FPE-06063-2005

Presented as ASABE Meeting Paper No. 046104 (if applicable)

Page Charges

☒ I agree to pay, at publication, a page charge based on the number of published journal pages. The current charge is \$100 (non-members \$110) per 8.5 by 11 inch published page in *Transactions of the ASAE* and *Applied Engineering in Agriculture* and \$50 (non-members \$55) per 6 by 9 inch published page in the *Journal of Agricultural Safety and Health*.

Copyright Transfer

If my manuscript is accepted for publication by ASABE, I hereby assign and transfer to the American Society of Agricultural and Biological Engineers all right, title, and interest in and to the copyright in said manuscript.

The American Society of Agricultural and Biological Engineers in turn hereby grants to the Author and, in the case of a work made for hire, his employer, a nonexclusive, royalty-free license to use, reproduce, and distribute the article including the right to sublicense the copyright in the published article, provided that each copy shall include the copyright notice appearing on the published article.

No manuscript shall be published by ASABE unless the Society has received this transfer signed by at least one author who can represent the others. If the reported work is made for hire, this assignment should be signed by an authorized representative of the employer.

SIGN HERE (If you are a U.S. Government employee see below.)

Jatuphong Varith
 Corresponding Author

Sept. 11, 2005
 Date

If submitting to the *Journal of Agricultural Safety and Health* ALL other authors must sign.

Author

Date

Author

Date

OR SIGN HERE

☐ The article cited was prepared by a U.S. Government employee as part of official duties and legally cannot be copyrighted.

Author

Date

American Society of Agricultural and Biological Engineers
www.asabe.org

E-mail การส่งตีพิมพ์บทความวิชาการที่ 1

From: vander@asabe.org
Sent: Wednesday, September 07, 2005 9:16 PM
To: jatuphon@mju.ac.th
Subject: Manuscript submitted - FPE-06063-2005

Dear Jatuphong Varith:

Thank you for submitting your manuscript "EFFECTS OF MICROWAVE POWER, TREATMENT TIME AND SAMPLE ORIENTATION ON HEAT DISTRIBUTION IN MANGO" for publication in Transactions of the ASAE. Your manuscript number is FPE-06063-2005. Please make reference to this number in any future correspondence.

If you have not already done so, please send a signed copyright transfer form (<http://www.asabe.org/pubs/authguide.html#msform>) to me as soon as possible. After receiving the copyright form, we will send the manuscript to the appropriate ASAE editor for review. You will hear directly from the editor after the reviews have been completed.

To check the status of your manuscript return to <http://asaejournals.manuscriptcentral.com> where you will find it listed.

You will receive a notice of the total page charges due along with your final page proof (<http://www.asabe.org/pubs/journalsub.html#page>).

Thank you for publishing with ASAE.

Ms. Nancy VanderVeen
Manuscript Coordinator
ASABE
2950 Niles Road
St. Joseph, MI 49085-9659 USA

Phone: 269-429-0300 ext. 310
Fax: 269-429-3852
E-mail: vander@asabe.org

ภาคผนวก ข.
บทความวิชาการที่ 2.

Varith, J., W. Sirikajornjaru, and T. Kiatsiriroat 2005. Microwave-Vapor Heating Technique for Mango Quarantine Treatment: Insect Mortality and Fruit Quality. *Postharvest Biology and Technology*. In review. Impact factor 2004 = 1.714

Postharvest Biology and Technology: PDF for review

Journal	Postharvest Biology and Technology
Article ID	POSTEC_457
Title	Microwave-Vapor Heating Technique for Mango Quarantine Treatment: Oriental Fruit Fly Mortality and Fruit Quality
Version	2
Article type	Full-length article
Submitted	18 Aug 05

Files submitted

Name	Fig No	Format	Use	Description
Mango quarantine-V2.doc		Manuscript (Microsoft Word)		Full text, Figure captures, Table
Figure 6-v2.doc	6	Figures (Microsoft Word)	Yes	
Figure2-v2.tif	2	Figures (TIFF)	Maybe	Damage area determination of mango peel using measuring tool in Adobe® Acrobat Professional® version 6.0.
Figure 4-v2.doc	4	Figures (Microsoft Word)	Yes	
Figure 5-v2.doc	5	Figures (Microsoft Word)	Yes	
Figure 8-v2.doc	8	Figures (Microsoft Word)	Yes	
Figure 1-v2.doc	1	Figures (Microsoft Word)	Yes	

Figure 3-v2.doc	3	Figures (Microsoft Word)	Yes	
Figure 7-v2.doc	7	Figures (Microsoft Word)	Yes	
Figure 9-v2.doc	9	Figures (Microsoft Word)	Yes	
Figure 10-v2.doc	10	Figures (Microsoft Word)	Yes	

Microwave-Vapor Heating Technique for Mango Quarantine Treatment: Oriental Fruit Fly Mortality and Fruit Quality

J. Varith ^{a,*}, W. Sirikajornjaru ^b, and T. Kiatsiriroat ^c

^a Department of Agricultural & Food Engineering, Maejo University, Chiang Mai, 50290, Thailand

^b Department of Plant Protection, Maejo University, Chiang Mai, 50290, Thailand

^c Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University, 50200, Thailand

Abstract

The objective of this research was to develop a microwave-vapor heat treatment (MVHT) for 'Namdokmai Si Thong' mango (*Mangifera indica* L.) to quarantine oriental fruit fly (*Dacus dorsalis* H.). Mortality rate of egg and quality acceptability characterized by Thermal-Death-Time (TDT) and Thermal-Quality-Time (TQT) overlay plot was first obtained by hot-water immersion. Two treatments within a range of acceptable mango quality were selected for infestation experiment to confirm MVHT quarantine process. Results show that the effective quarantine temperature was higher than 48°C for a minimum time of 2 min. The MVHT using microwave for preheating followed by vapor for holding processes effectively disinfested oriental fruit fly egg up to 100%. Changes in physio-chemical properties, namely, color, titratable acid (TA), total soluble solid (TSS), TSS/TA, and firmness, of MVHT mango were not significantly difference ($p>0.05$) than those of the control. MVHT offered less percent of heat damage on mango than conventional VHT and shortened quarantine process time more than 90% during come-up period. MVHTs also retained equivalent or better lethality effect on oriental fruit fly eggs than did by the conventional VHT.

Keywords. Microwave-vapor heat, Quarantine treatment, Oriental fruit fly, Mango, Quality.

*Corresponding author. Tel.: +66-53-87-8902, fax: +66-53-49-8902 E-mail addresses: jatuphon@mju.ac.th (J. Varith)

26 1. Introduction

27 The export of Thai mango (*Mangifera indica* L.) exhibits increasing trend due to the high value
28 added to the commodity. In 2004, the export value per kilogram of mango increased about 58%
29 compared to the export value in 2003 (Office of Agriculture Economics, 2005). This increasing trend
30 initiates the awareness of Thai agro-industries about the regulation of trading countries. One of the
31 major threats to the premium markets such as Japan and Australia for Thai mango is the presence of
32 oriental fruit fly (*Dacus dorsalis* H.) inside the fruit. Since cancellation of ethylene dibromide (EDB)
33 fumigation from the past two decades, non-chemical quarantine treatments, e.g., vapor heat treatment
34 (VHT) and hot water dipping became the common methods to control this pest. Recently, an interest
35 of electromagnetic treatments, for instant, microwave and radio frequency, to control oriental fruit fly
36 in fruits has emerged. Microwave rapidly generates heat in food materials and may be used as an
37 alternative to conventional VHT which has drawback due to its slow come-up period.
38 According to Thai regulation for mango export, general guideline to disinfest oriental fruit fly in
39 mango using VHT was accomplished by monitoring the cold spot of mango at 47°C for 20 min
40 during VHT. This treatment achieved thermal death time higher than *5D* (equivalent to $LT_{99.999}$) for
41 the first instars (16.45 min) and the egg of oriental fruit fly (<8.91 min) (Jang, 1986), but slightly
42 lower than *5D* for the third instars (22.3 min) (Jang, 1991). An increase in internal temperature of
43 mango up to 47°C by VHT would take longer than 45 min, hence the fruit would be susceptible to
44 heat damage. With rapid heating by microwave, a concept of high-temperature-short-time (HTST)
45 treatment is possible to shorten treatment time while retaining lethality effect higher than *5D*. The
46 HTST concept is extensively used in food processing to minimize thermal degradation of food
47 quality (Stumbo, 1973; Lund, 1977; and Holdsworth, 1997) and may be applicable for insect
48 quarantine process. Tang et al. (2000) proposed the HTST thermal quarantine methods using radio
49 frequency to control codling moth larvae in in-shell walnuts to be a temperature range of 50-54°C.
50 The third instars codling moth in cherry was also studied (Ikediala et al., 1999). The 915 MHz

51 microwave treatment on cherries can achieve the fruit temperatures of 45, 50, and 55°C but quality of
52 fruit was promising with treatments of temperature less than 50°C.

53 With regard to mango quarantine treatment, HTST[†] could give several advantages over the
54 conventional heating in term of shortening of come-up time, equivalent or better quality retention,
55 energy minimization, and insect mortality assurance due to high temperature treatment. Varith and
56 Kiatsiriroat (2004) studied the microwave heating on Chokanan mango with 2,450 MHz / 800 W-
57 microwave oven and found an increase of internal temperature up to 46°C within 40 s. Heat
58 distribution inside the fruit depended on fruit orientation, microwave power and treatment time. The
59 horizontal positioned mango treated with 50% microwave power yielded better heat distribution than
60 the vertical one. Continuing to this work, our purpose was to develop a full microwave-vapor heat
61 treatment (MVHT) for oriental fruit fly quarantine process in Namdokmai Si Thong mango which is
62 the export variety. The first experiment explored the lacking information of thermal death and
63 quality kinetics at temperature higher than 48°C. The MVHT process was then developed based on
64 thermal death and quality kinetics. Finally, experiments were conducted to confirm the MVHT
65 quarantine method along with measurement of changes in mango quality after the MVHT process.

67 2. Materials and Methods

68 2.1 Materials

69 Namdokmai Si Thong mangoes freshly harvested from two orchards in Chiang Mai, Thailand, were
70 used in this research. The first orchard provided domestic-graded mango while the second orchard
71 offered export-graded one. The domestic-graded mangoes were primarily used for insect mortality
72 study while the export graded-mangoes were used for a study of changes in quality after MVHT.
73 During fruiting stage, intact export-graded mango was enfolded with horticultural envelope while the
74 domestic graded one was enfolded with the regular white paper. This yielded a major difference in
75 color of skin where domestic-graded mango dominated the green color while the export-graded
76 mango dominated the yellow one (Table 1). Other physical-chemical properties of mango between

two orchards were not different. After harvesting, each lot of mango was stored at 13°C / 90%RH for 48 h prior to the experiment. The experiment was accomplished within 72 h to avoid effect of ripening. Each mango weighed between 300-330 g/fruit with maturity of 80% (commercially estimated). Firmness was characterized with two parameters; failure force at rupture point and apparent elastic modulus (ASAE Standards, 2003). Details of firmness measurement were discussed further. Eight hours prior to the test, the samples were equilibrated in room condition of 25°C / 60%RH. Thermo-physical properties of domestic- and export-graded mangoes measured at the room condition (25°C / 60%RH) are presented in Table 1.

2.2 Mass rearing of oriental fruit fly

Oriental fruit fly pupae were reared in the Department of Plant Protection, Maejo University, in screen cages at 25-27°C / 70%RH. Flies that emerged were provided with sugar, hydrolyzed yeast protein, and water. Eggs were collected from mature females (10-14 days old) during 1-h period. Eggs used in mortality study were transferred into agar gel box (size of 30x55x20 mm) while those used in infestation experiment were transferred in the mango fruit.

2.3 Preliminary study of mortality rate and quality acceptability

Mortality rate of oriental fruit fly eggs were studied using hot water immersion technique. Two hundred eggs were incubated on a thin layer of agar gel inside the plastic boxes (fifty eggs each). For each treatment, four incubated boxes were immersed into water bath model MD16-G (Julabo Labortechnik GmbH, Germany) with an accuracy of $\pm 0.5^\circ\text{C}$ under the controlled temperature of 46, 48, 51, and 55°C for 2, 5, 12 and 20 min. This resulted in a total of 3200 eggs. It is noted that an increase in medium temperature within $\pm 0.5^\circ\text{C}$ of the desired temperature required approximately 10 min. Therefore, all mortality treatments were subjected to the additional come-up time of 10 min; bringing on the actual immersion time of 12, 15, 22 and 30 min. It was also assumed that thermal

102 lethality effect on insect during come-up period was less significant than that during holding period
103 and was negligible.

104 For quality acceptability, four mangoes (domestic graded) per treatment were immersed in hot water
105 bath under the desired temperatures of 46, 48, 51, and 55°C for 2, 5, 12 and 20 min, equivalent to the
106 mortality study. The experiment was replicated twice, resulting in a total of 128 fruits. To reach
107 temperature within $\pm 0.5^\circ\text{C}$ of the designated temperature, the extra five minutes were required so that
108 the actual elapsed time were 7, 10, 12 and 20 min. After hot water immersion, treated mango was
109 hydro-cooled with 25°C sprayed water for 30 min. All treated mangoes were then stored at 13°C /
110 90%RH for 3 days before assessing the heat damage by percent of browning area. Details of heat
111 damage assessment are discussed in section 2.6.

112 To quantify the acceptable temperature and time for quarantine treatment, Thermal-Death-Time
113 (TDT) plot of insect mortality was established, overlaying with Thermal-Quality-Time (TQT) plot.
114 TDT plot exhibited ranges of insect mortality while TQT plot indicated percent of damage area on
115 mango peel. Acceptable quarantine process was an area in overlay plot where the insect was 100%
116 killed and no damage on mango. Treatments of acceptable temperature and time were selected for
117 further full-quarantine process development in the next experiment.

118

119 **2.4 Development of MVHT Quarantine Process**

120 For MVHT process development on mango, preheat during come-up period was accomplished by
121 microwave treatment adapted from Varith and Kiatsiriroat (2004) where Chokanan mango treated
122 with MW power of 400 W for 40 sec increased its internal temperature at the cheek area up to 46°C.
123 Export-graded mango was treated with MW power of 50% using 2,450 MHz / 800 W microwave
124 oven model R-254 (Sharp Co., Ltd., Japan). MW preheat treatment was divided into 2 steps. Firstly,
125 the mango was placed in horizontal position on a polypropylene support at center of the oven and
126 rotated while being heated with MW power of 400 W for 40 s (Figure 1a). Secondly, the mango was
127 placed approximately 20 mm away from the exit of waveguide without rotation (Figure 1b). The

25°C water of 1800 cm³ was placed beside the mango to absorb microwave after penetrating through the mango and to reduce the microwave reflection back to the mango. This step provided a virtual 1-D radiation focusing at the mango cheek which was the thickest part and subjected to the slowest heating during conventional VHT heating. Finally, mango was transferred to a vapor (saturated steam) cabinet for VHT holding process where temperature inside was controlled at 55±1°C using temperature controller and solid state relay. During treatments, mangoes were sampled in 4-5 periods and cut in-half for a thermography imaging. Then, thermography images of the sectional mangoes were quickly taken for step-wised heat distribution during MW and VHT periods using thermal imaging camera model IR FlexCam™ (Infrared Solutions, Inc., MN, USA). After MW treatment, the slowest heating spot during MVHT process was identified and used as a reference for holding temperature during VHT. After preheating and holding period of MVHT, the mango was cooled down with showering water of 25°C for 30 min. All MVHT preliminary experiments were replicated six times with six mangoes each. Treated mangoes were stored at 13°C / 90%RH for 24 h for assessment of percent damage on peel and flesh. Figure 1 schematically demonstrated the steps of MVHT quarantine treatment on mango.

2.5 Confirmation experiments on MVHT and VHT quarantine processes: insect mortality and fruit quality

Two selected time-temperature combination in acceptable range of TDT and TQT curve were selected for the infestation experiment. Each domestic-graded mango was infested with fifty eggs onto the flesh slice, about 23 mm deep from the peel, and sealed with clear tape to prevent leakage of water into infested area. Two MVHTs and one conventional VHT using 55°C saturated vapor were selected for quarantine treatments. Experiment was replicated twice which led to a total of 48 mangoes with 2,400 eggs. Treated mangoes were then stored at 25°C / 70% RH to observe an emergence of larvae. Morality rate of oriental fruit fly egg (reciprocal of percent of egg emergence) was reported.

For quality changes over a period of storage time, two selected MVHT and one VHT treatments were performed on 48 export-graded mangoes with two replications of six fruits per treatment. After treatment, mangoes were stored at 13°C / 80%RH for 15 days. Quality measurements, namely, color of peel and flesh, firmness, titratable acid (TA), total soluble solid content (TSS) and ratio of TA/TSS were determined on two mangoes from each replication for every third day. Quality parameters were analyzed using Analysis of Variance (ANOVA) using StatView™ version 5.0 (SAS Institute, Inc., NC) with 95% confident interval. Quality parameters were reported significantly different when $p < 0.05$.

2.6 Quality measurement methods

Color: Spectroscopy model MiniScan XE (Hunter Associates Laboratory, Inc., Reston, VA) was used to measure color of mango. Measuring condition was set using 10/45° angle with D65 illuminant. Spectroscopy was standardized with white and black plates following the factory protocol. CIE scale (L^* - a^* - b^*) was reported as the color parameters. Measured parameter L^* indicated lightness with scale from 0 to 100; a^* indicated red ($-a^*$) to green ($+a^*$); and b^* indicated yellow ($-b^*$) to blue ($+b^*$) scale.

Firmness: Firmness of mango was determined by two means under penetration test; 1. maximum force at rupture; and 2. apparent elastic modulus followed the guideline of ASAE S386.4 DEC00 (ASAE Standards, 2003). Stainless steel probe with a diameter of 6 mm and radius of curvature of indenter about 66.9 mm was used to penetrate mango flesh to 10 mm in depth. Cross-head speed was set at 1 mm/s. Apparent elastic modulus (E) was calculated using Equation 1 as:

$$E = \frac{0.338 K_u^{\frac{2}{3}} F (1 - \mu^2) \left(\frac{4}{d} \right)^{\frac{1}{2}}}{D^{\frac{2}{3}}} \quad [1]$$

where E = apparent modulus of elasticity (Pa); D =deformation (m); μ =Poisson's ratio (assumed to be 0.45); F =force (N); K_u =dimensionless factor (=1.351 for a flat surface-indenter test); and d =diameter of curvature of the spherical indenter.

179 *Titratable acid (TA)*: TA was determined by indicator method followed the guideline of AOAC
 180 942.15. (AOAC, 1996).

181 *Total soluble solid content (TSS)*: TSS was determined by hand refractometer model N-1α (Atego
 182 Co., Ltd, Japan).

183 *Heat damage assessment*: Heat damaged on treated mango was assessed from percent of browning
 184 area of the peel or whitening area of the flesh. While being placed on a graphical paper, the mango
 185 was captured by a digital camera and then transferred into Adobe® Acrobat Professional® version 6.0
 186 for the area determination using area measuring tool (Figure 2). Percent of damage and non-damage
 187 on each mango was assessed from:

$$188 \quad \% \text{ damage} = \frac{\text{Browning or whitening area of damage}}{\text{Total area}} \quad [2]$$

189

190 **3. Results and Discussion**

191 **3.1 Preliminary study on mortality rate and quality acceptability**

192 Table 2 shows that oriental fruit fly in egg stage was susceptible to heat tolerance at 46°C up to 12
 193 min. Our results agreed with the data presented by Jang (1986) that gave a calculated lethality time in
 194 egg stage of 8.91 min and yielded thermal death rate of 5D (LT_{99.999}). However, the thermal death
 195 rate data of egg above 48°C were absent. Since our result indicates that the temperature higher than
 196 48°C with holding time at least 2 min yielded 100% mortality, these treatments were promising for
 197 the holding condition for further MVHT quarantine treatment of mango.

198 Table 3 indicates that the mangoes undergoing treatment at 51°C with holding time up to 12 min
 199 were not damage due to heat. Mangoes subjected to heat at 51°C for 20 min and 55°C for 5 min were
 200 slightly susceptible to damage less than 5%. With temperature of 55°C for holding time longer than 5
 201 min, heat damage on mango increased no more than 15%. The TDT and TQT overlay plot (Figure 3)
 202 shows the shaded area of quarantine treatment. Therefore to assure non-damaged quarantined fruit,
 203 the upper boundary of quality acceptance was approximately at 55°C for short period of time for 2

min, down to 48°C for 20 min. On the other hand, oriental fruit fly egg mortality was 100% effectively disinfested with the lower boundary of 46°C for 20 min up to 48°C for 2 min. The crossing area between upper boundary of quality acceptability and lower boundary of insect mortality were usable for HTST quarantine development using MVHT process.

208

3.2 Development of MVHT Quarantine Treatment

Several MW preheat configuration of mango in MW cavity were examined but four effective treatments were selected as follows:

Treatment a: Mango was heated with MW power of 400 W for 40 s while being placed at the center of cavity and rotated horizontally (Figure 1a). Rotation was paused at half time of treatment to turn over the mango for MW absorbing equilibration. This treatment was denoted as MW20/20a

Treatment b: Mango from treatment a was transferred to the second MW oven. The fruit was placed about 20 mm from the exit of MW waveguide with water load behind the mango to absorb MW (Figure 1b). MW power was set at 400 W for 20 s treatment with the 10 s turning process each. This treatment was denoted as MW10/10b.

Treatment c: Mango was treated in similar manner of Treatment a but using MW power of 400 W for 70 s with 35 s turning process each. This treatment was denoted as MW35/35c.

Treatment d: Mango was treated in similar manner of Treatment b but using MW power of 400 W for 70 s with 35 s turning process each. This treatment was denoted as MW35/35d.

The preheat treatments of MW20/20a and MW35/35c yielded an internal temperature of mango higher than 47°C which was usable for the further VHT treatment. Figure 4 demonstrates that MW20/20a increased the internal temperature of the mango up to 54°C. However, heat was concentrated at location near stem and apex of the fruit. Cold spot was observed at the lower cheek (see cold spot of MW20/20a in Figure 4). With an addition of MW10/10b treatment, heat was added around the center area of the fruit as well as at the cold spot. Therefore, after being preheated with

230 MW20/20a and MW10/10b treatments, mango increased its internal temperature to a range of 51-
 231 57°C while the outer part attained about 46°C. This condition satisfied the initial temperature to
 232 quarantine oriental fruit fly during come-up period. As quarantine treatment proceeded to the holding
 233 process by VHT, the internal temperature started to decay but remained higher than 47°C. Thermal
 234 image at 3 min in Figure 4 (1 min for MW heating and 2 min for VHT) revealed that the internal
 235 temperature of mango started to even out at the temperature higher than 47°C in all parts. Therefore,
 236 it is suggested that the holding period of quarantine treatment may require two extra minutes in VHT
 237 chamber to homogenize the internal temperature of the mango. It should be noted after MW preheat
 238 treatments, temperature at the areas of stem, lower cheek and apex (point 1, 3 and 4 in Figure 4,
 239 accordingly) changed faster than the upper cheek area (point 2) when subjected to the external
 240 convection heating, possibly due to its less thermal mass. Therefore, point 2 at the cheek and point 3
 241 at the cold spot may be used as the control points for MVHT process.
 242 Figure 5 shows that treatment combination of MW35/35c and MW35/35d increased the internal
 243 temperature of mango beyond 50°C in most part of the mango, where the lowest temperature
 244 appeared at location near the stem (point 1 in Figure 5). The highest temperature appeared at the
 245 cheek. After 2 min of continuing VHT treatment, the internal temperature started to equilibrate in all
 246 parts where heat concentrated at the cheek diffused outward to the skin, Until 5 to 10 min after
 247 starting VHT, temperature of the whole fruit was totally equilibrated with temperature approximately
 248 53°C. Therefore, it seems that the temperature created by treatment MW35/35c, MW35/35d and
 249 VHT satisfied the high internal temperature approximately 50-55°C and might be used as a
 250 quarantine treatment. However, it appears that the highly concentrated MW power caused severe
 251 damage on the cheek. This corresponds to the TQT plot where the mango undertaken treatment
 252 higher than 51°C could not withstand the long holding time before damage occurred. After storing
 253 for 48 h in 13°C / 90%RH condition, heat damage was found to have a collapsed browning skin and
 254 the fruit was not acceptable. Therefore, the preheat treatments of MW35/35c plus MW35/35d were

excluded from this work. Treatments of MW20/20a and MW10/10b followed by VHT were selected as a HTST quarantine process further parts of this research.

257

3.3 Confirmation experiments on MVHT and VHT quarantine process: insect mortality and fruit quality

From TDT and TQT analysis together with MVHT development, two MVHT and one VHT quarantine processes were selected as follows:

MVHT1: Pre-heating process composed of MW20/20a, followed by MW10/10b. Holding process was performed by VHT 55°C for 18 min. Cooling process afterward was carried out by water showering at 25°C for 30 min. This process satisfied the quarantine protocol with 100% mortality with damage on fruit less than 15%.

MVHT2: Pre-heating process was completed with the same process as MVHT1 but shorter VHT 55°C holding time for 7 min. Cooling process afterward was performed by water showering at 25°C for 30 min. This process satisfied the quarantine protocol with 100% mortality with no damage on fruit.

VHT47: Pre-heating process was performed by vapor at 55°C using temperature near pit (location 2 in Figure 4) as a control point. Holding process of 18 min began when control point reach 47°C under vapor temperature of 55°C. Cooling process afterward was performed by water showering at 25°C for 30 min. This process satisfied the quarantine protocol with 90% mortality rate (LD) as reported by Jang (1986).

Table 4 indicates that MVHT1 and MVHT2 yielded 100% mortality of the oriental fruit fly infested into the mango. VHT47 provided 96.2% mortality which was closed to estimation from our TDT plot and also in proximity with kinetics study of Jang (1986). Mangoes treated with MVHT2 showed no sign of skin damage but did in MVHT1 and VHT47. However, a slight damage ($\approx 1\%$) of MVHT2 mango was observed as a consequence of heat concentrated at the apex of pit. This flesh damage appeared to be white-collapsed tissue due to high heat concentration but not progressive to be rotten.

281 Damage on the MVHT1 mango was more severe than did on the MVHT2 one while damage on the
 282 VHT47 mango was the most severe with progressive shrinkage of tissue at the apex of the fruit.
 283 Considering time-wised comparison, the come-up periods of MVHT1 and MVHT2 were
 284 accomplished within 2 min. After that, treated mangoes were pre-holding with 55°C saturated vapor
 285 for another 2 min before the actual holding time started. This brought on a total elapsed time during
 286 come-up period about 4 min. On the other hand, the come-up period of VHT47 took approximately
 287 45 min with 55°C saturated vapor to reach the internal temperature of 47°C. Thus, MVHTs shortened
 288 process time during come-up period about 91%. Figure 6 demonstrates heating-cooling profiles of
 289 MVHTs and VHT47 treatments using 55°C vapor as a heat source.

290 Regarding quality changes after treatment, Figure 7a demonstrates that TA significantly decreased
 291 ($p < 0.01$) while being stored for 10 days. However, there was a slight increase in TA at day 13 with
 292 unknown reason. In contrary, TSS, which represented the source of sucrose, significantly increased
 293 ($p < 0.01$) during 13 days in storage (Figure 7b). The same increasing trend was observed on ratio of
 294 TSS/TA (Figure 7c). There was no significant difference ($p = 0.07$) among treatments affecting TA,
 295 TSS and TSS/TA. It means that MVHT1, MVHT2 and VHT47 did not affect the changes in physio-
 296 chemical of mango during a period of storage, except for some heat damage on the fruit.

297 Figure 8a and 8b indicates that firmness as defined by maximum force at rupture and apparent elastic
 298 modulus significantly decreased ($p < 0.01$) during 13 days of storage. There was no significant
 299 difference in firmness ($p = 0.36$) among all MVHTs and VHT47 treated mango. In our observation,
 300 the mangoes with and without treatments showed sign of softening as they were undergoing ripening
 301 process, which corresponded to the measured firmness value.

302 During 13 days of storage, L^* and a^* of mango peel significantly decreased ($p < 0.01$) while b^*
 303 significantly increased ($p < 0.01$) (Figure 9). That means the mango peel with long storage time was
 304 slightly more saturated yellow than those with shorter period of storage. There was no significant
 305 difference ($p > 0.05$) in all color parameters among MVHT and VHT treatments. Similar trends were
 306 observed on the mango flesh during 13 days of storage (Figure 10). L^* and a^* of mango flesh

307 significantly decreased ($p < 0.01$) while b^* significantly increased ($p < 0.01$). However, the narrower
 308 error bars for color parameters of flesh than those of the peel indicated less variation of color changes
 309 during storage. Thus, the color changes of the flesh may be used an indicator for the ripening process
 310 of mango more precisely than those of the peel. Finally, it can be concluded that either MVHTs or
 311 VHT yielded the similar ripening effect as did in non-treated mango due to the similar trend of
 312 physio-chemical changes after quarantine treatment processes.

313

314 4. Conclusions

315 1. TDT and TQT overlay plot for HTST was established. The oriental fruit fly egg was effectively
 316 disinfested with temperature higher than 48°C with a minimum holding time of 2 min. Meanwhile
 317 mango was susceptible to heat damage with upper boundary of quality acceptance at 55°C for 2 min,
 318 downward to 46°C for 20 min.

319 2. A MW preheat treatment of MW20/20a followed by MW10/10b increased the internal temperature
 320 of mango higher than 54°C. Then, internal temperature started to decay due to the diffusion of heat
 321 outward to skin. An addition of VHT holding process can homogenize the temperature throughout
 322 the whole fruit to remain the temperature higher than 47°C.

323 3. Mango infested with oriental fruit fly egg treated with MVHT2 resulted in 100% mortality of
 324 insect and was least susceptible to heat damage ($\approx 1\%$). Mangoes treated with either MVHTs or VHT
 325 was undergoing the same ripening process as was in non-treated mango.

326

327 Acknowledgements

328 The authors are grateful to Thailand Research Fund for a financial support of this research. We
 329 sincerely thank to Entech Associates, Co., Ltd., Thailand, for providing the thermal imaging camera
 330 in this work. Our appreciation is extended to Sanwasan Yodkhum and Prud Netsawang, two graduate
 331 research assistants at CMU and MJU, for their assistance on laboratory work.

332

333 References

- 334 AOAC, 1996. AOAC Official Method 942.15: Acidity (Titratable) of Fruit Products. Official
 335 Methods of Analysis of AOAC International. 16th Ed. Gaithersburg, Maryl.: AOAC.
- 336 ASAE Standards, 2003. Compression Test of Food Materials of Convex Shape. ASAE S368.4
 337 DEC00. St. Joseph, Mich.: ASAE, 595-603.
- 338 Holdsworth, S.D., 1997. Thermal processing of packaged foods. Blackie Academic and Professional,
 339 London, UK.
- 340 Ikediala, J.N., Tang, J., Neven, L.G., Drake, S.R., 1999. Quarantine treatment of cherries using 915
 341 MHz microwave: temperature mapping, codling moth mortality and fruit quality. Postharvest Biol.
 342 Technol. 16, 127-137.
- 343 Jang, E.B., 1986. Kinetics of thermal death in eggs and first instars of three species of fruit flies
 344 (Diptera: Tephritidae). J. Econ. Entomol. 79, 700-705.
- 345 Jang, E.B., 1991. Thermal death kinetics and heat tolerance in earl and late third instars of the
 346 oriental fruit fly (Diptera: Tephritidae). J. Econ. Entomol. 84, 1298-1303.
- 347 Lund, D.B., 1977. Design of thermal processes for maximizing nutrient retention. Food Technol. 31,
 348 71-78.
- 349 Office of Agriculture Economics, 2005. Import-export statistic. On-line: www.oae.go.th. Aug 18.
- 350 Stumbo, C.R., 1973. Thermobacteriology in Food Processing. Academic Press, Inc, New York.
- 351 Sweat, V.E., Haugh, C.G., 1974. A thermal conductivity probe for small food samples. Trans. ASAE.
 352 17, 56-58.
- 353 TA Instruments. 1998. Differential Scanning Calorimeter Theory & Applications. Extrad
 354 Instrumentation Pte, Ltd., Singapore.
- 355 Tang, J., Ikediala, J.N., Wang, S., Hansen, J.D., Cavalieri, R.P., 2000. High-temperature-short-time
 356 thermal quarantine methods. Postharvest Biol. Technol. 21, 129-145.
- 357 Varith J., T. Kiatsiriroat. 2004. Effects of microwave power, treatment time and sample orientation
 358 on heat distribution in mango. ASAE Paper No. 04-6104. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- 359

359 **Tables**

360 Table 1. Basic thermo-physical properties of two crops of Namdokmai Si Thong mango at 25°C.

Thermo-physical property	Value	Unit	Measuring device/method
Fruit whole mass (m)	0.313 ± 0.009	Kg	0.01 g precision balance
Density of flesh (ρ)	973.0 ± 29.0	Kg/m ³	Mass / volume of flesh cylinder ¹
Specific gravity	1.006 ± 0.004	-	Water replacement
Thermal conductivity (k)	0.474 ± 0.015	W/m-°C	Line-heat source ²
Specific heat (C_p)	3.795 ± 0.211	kJ/kg-°C	Differential scanning calorimetry ³
Firmness			
Failure force	3.27 ± 0.52	N	Texture Analyzer with $\phi 6$ mm
Apparent elastic modulus	1.69 ± 0.31	MPa	probe using ASAE standards
Total soluble solid content (TSS)	8.05 ± 0.74	°Brix	Refractometer
Titratable acid (TA)	0.034 ± 0.013	%	Indicator method
Color of peel / flesh1 (export)			
L*	$64.1 \pm 2.2 / 71.2 \pm 3.4$		
a*	$-4.1 \pm 1.9 / -0.9 \pm 0.2$		
b*	$34.9 \pm 1.8 / 17.6 \pm 4.5$		Spectrophotometer model
Color of peel / flesh2 (domestic)			MiniScan XE (Hunter Associates
L*	$66.6 \pm 3.6 / 69.2 \pm 2.4$		Laboratory, Inc., Reston, VA)
a*	$-9.6 \pm 3.5 / -1.2 \pm 0.5$		
b*	$37.2 \pm 2.8 / 16.5 \pm 4.3$		

361 1. Average values with S.D. of 4 fruits from each orchard, 2 measurements per fruit.

362 2. Probe made by Thermal Logic, Pullman, WA; Thermal power/unit length = 3.40 W/m; Guideline by Sweat and Haugh
363 (1974)

364 3. Guideline by TA Instruments (1998); Scan rate of 1°C/min.

365

366 Table 2. Mortality rate of oriental fruit fly treated with combination of time and temperature during
 367 egg stage.

Time (min)	Mortality rate (%)			
	46°C	48°C	51°C	55°C
2	55.9	100	100	100
5	48.8	100	100	100
12	96.7	100	100	100
20	100	100	100	100

368

369

370

371 Table 3. Percent damage on mango skin after hot-water immersion at various times and temperatures.

Time (min)	Fruit damage (%)			
	46°C	48°C	51°C	55°C
2	0	0	0	0
5	0	0	0	3.6
12	0	0	0	12.7
20	0	0	4.5	11.9

372

373

374

374 Table 4. Mortality rate of oriental fruit fly egg and percent damage of mango treated with MVHTs
 375 and VHT.

Treatment	Mortality rate (%)	Fruit damage (%)		General appearances
		External	Internal	
MVHT1	100	15.2	11.4	External skin browning with internal collapsed tissue at stem and apex of pit but not progressive
MVHT2	100	0	1.1	Non-damage skin with slightly internal collapsed tissue at apex of pit but not progressive
VHT47	96.2	16.2	8.2	External skin browning, progressive damage with time and internal cooked tissue at apex of fruit

376

377

377 **Figure Captions**

378 Figure 1. Steps of MW heating on mango: a) horizontal-MW heating, and b) MW heating with water
379 load.

380 Figure 2. Damage area determination of mango peel using measuring tool in Adobe® Acrobat
381 Profession® version 6.0.

382 Figure 3. TDT versus TQT plot for mango quarantine treatment. Each point represents an average of
383 8 fruits for quality or 200 eggs for mortality rate evaluation.

384 Figure 4. Temperature history of MVHT mango treated with MW20/20a and MW10/10b (dashed
385 line), followed by VHT of 55°C (solid line). Locations of temperature taken inside mango
386 corresponded to numbers indicated in thermal image. Temperature mapping of mango was coded
387 according to color scaled bar.

388 Figure 5. Temperature history of MVHT mango treated with MW35/35c and MW35/35d (dashed
389 line), followed by VHT of 55°C (solid line). Locations of temperature taken inside mango
390 corresponded to numbers indicated in thermal image. Temperature mapping of mango was coded
391 according to color scaled bar.

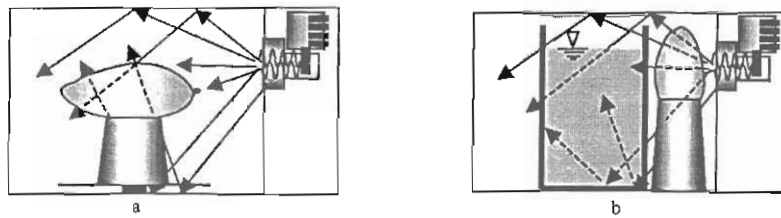
392 Figure 6. Temperature profiles of mango treated with MVHTs and VHT for quarantine process.
393 Number in each profile corresponds to location of temperature measurement presented in Figure 4.

394 Figure 7. Changes in titrable acid (TA), total soluble solid content (TSS) and TSS/TA of mango with
395 and without MVHTs during period of storage. Error bar indicated standard error of mean.

396 Figure 8. Changes in firmness of mango with and without MVHTs during period of storage. Error bar
397 indicated standard error of mean.

398 Figure 9. Changes in color of mango peel with and without MVHTs during period of storage. Error
399 bar indicated standard error of mean.

400 Figure 10. Changes in color of mango flesh with and without MVHTs during period of storage. Error
401 bar indicated standard error of mean.



7

8 Figure 1. Steps of MW heating on mango: a) horizontal-MW heating, and b) MW heating with water

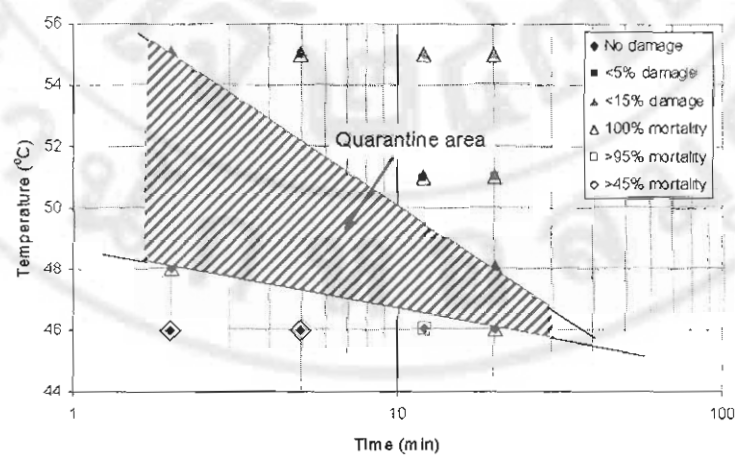
9

load.



380 Figure 2. Damage area determination of mango peel using measuring tool in Adobe® Acrobat

381 Profession® version 6.0.



4

5 Figure 3. TDT versus TQT plot for mango quarantine treatment. Each point represents an average of

6

8 fruits for quality or 200 eggs for mortality rate evaluation.

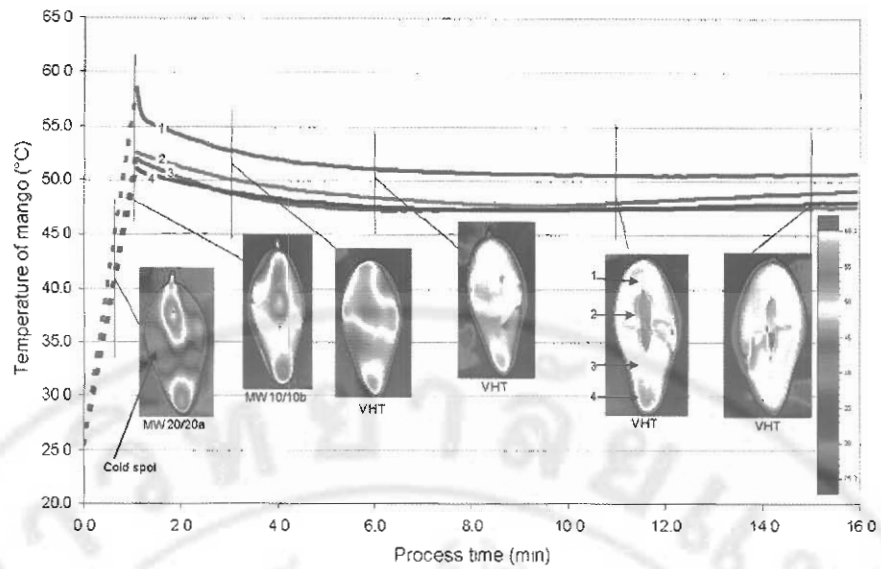


Figure 4. Temperature history of MVHT mango treated with MW20/20a and MW10/10b (dashed line), followed by VHT of 55°C (solid line). Locations of temperature taken inside mango corresponded to numbers indicated in thermal image. Temperature mapping of mango was coded according to color scaled bar.

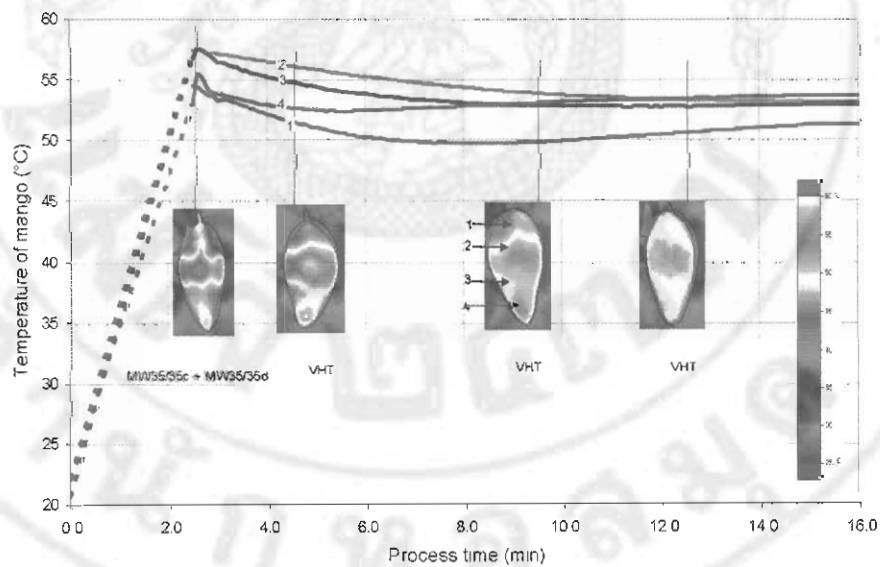
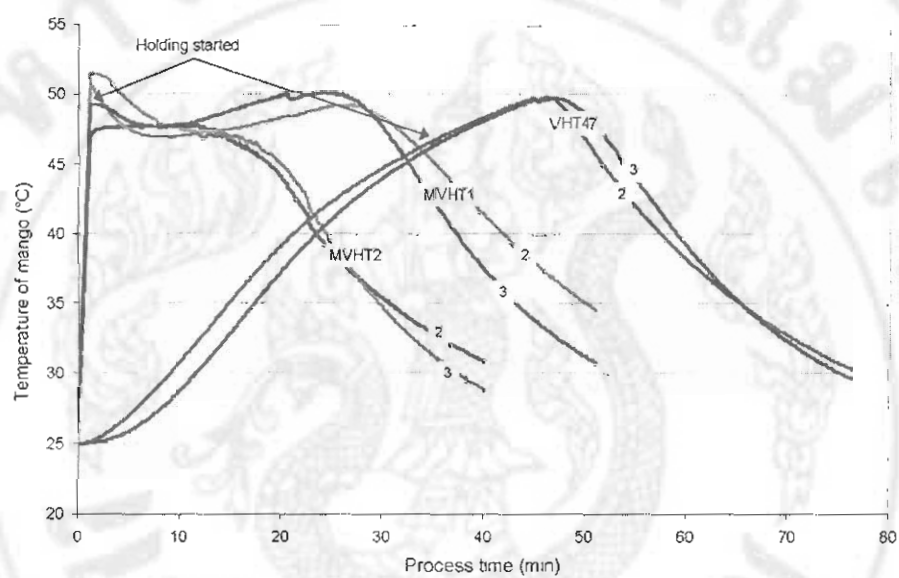


Figure 5. Temperature history of MVHT mango treated with MW35/35c and MW35/35d (dashed line), followed by VHT of 55°C (solid line). Locations of temperature taken inside mango corresponded to numbers indicated in thermal image. Temperature mapping of mango was coded according to color scaled bar.



5

6 Figure 6. Temperature profiles of mango treated with MVHTs and VHT for quarantine process.

7 Number in each profile corresponds to location of temperature measurement presented in Figure 4.

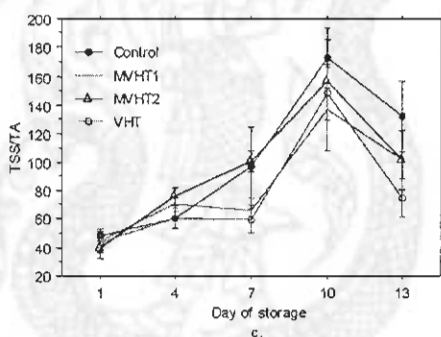
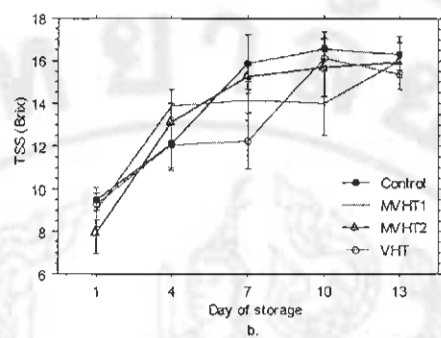
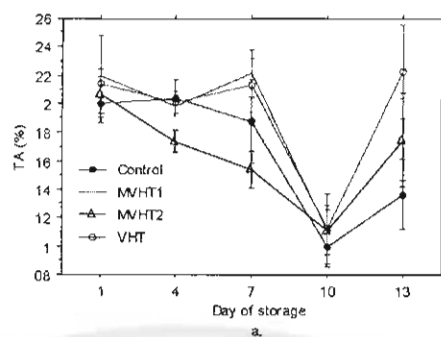


Figure 7. Changes in titrable acid (TA), total soluble solid content (TSS) and TSS/TA of mango with and without MVHTs during period of storage. Error bar indicated standard error of mean.

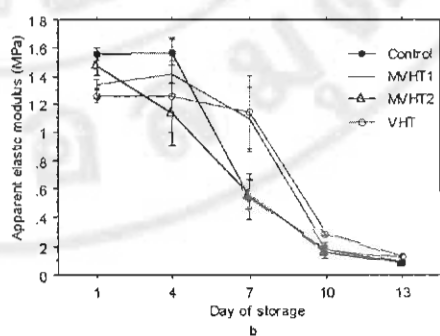
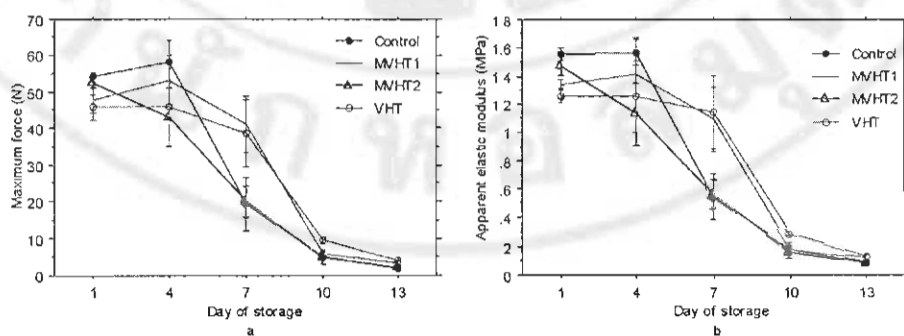


Figure 8. Changes in firmness of mango with and without MVHTs during period of storage. Error bar indicated standard error of mean.

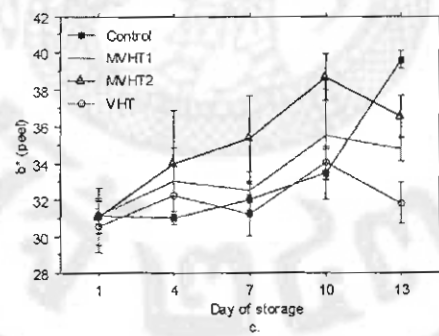
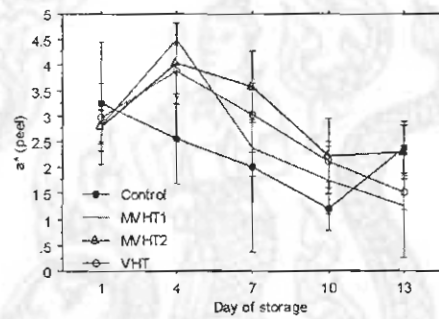
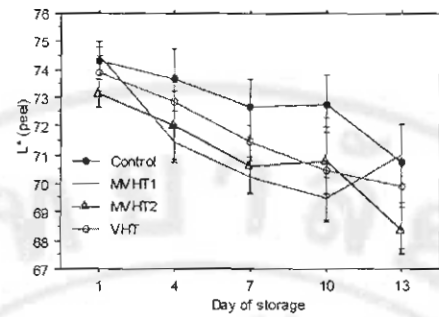


Figure 9. Changes in color of mango peel with and without MVHTs during period of storage. Error bar indicated standard error of mean.

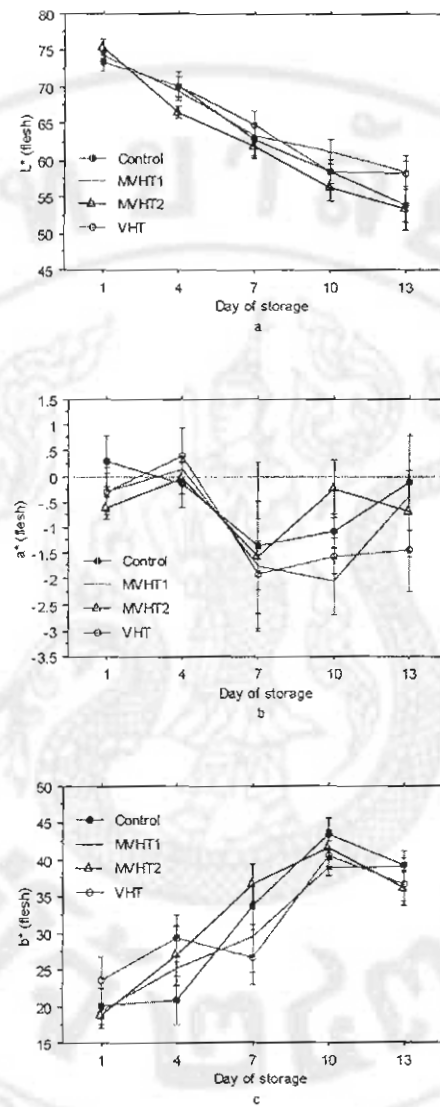


Figure 10. Changes in color of mango flesh with and without MVHTs during period of storage. Error bar indicated standard error of mean.

E-mail การส่งตีพิมพ์บทความวิชาการที่ 2

From: editorsupport@elsevier.com
Sent: Monday, August 29, 2005 9:51 PM
To: jatuphon@mju.ac.th
Subject: Confirmation revised paper POSTEC_457 submitted to Postharvest Biology and Technology

This is an automated message.

Dear Dr Varith,

On 29 Aug 2005 you submitted a revised paper number POSTEC_457 to the journal Postharvest Biology and Technology entitled:

"Microwave-Vapor Heating Technique for Mango Quarantine Treatment: Oriental Fruit Fly Mortality and Fruit Quality"

Your paper will be reviewed as soon as possible, and we will be in touch again in due course.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Dr Ian B. Ferguson
Sincerely,
Postharvest Biology and Technology: E-submission
E-submission website queries, please contact authorsupport@elsevier.com

Submission-specific queries, please contact:
Dr Ian B. Ferguson
Editor, IFerguson@hortresearch.co.nz

For technical queries contact authorsupport@elsevier.com; for queries specific to the status of your paper please contact Prof. Ian B. Ferguson at IFerguson@hortresearch.co.nz.

Submission details:

Journal: Postharvest Biology and Technology

Article ID: POSTEC_457

EOArticle ID: 05.159

Version: 2

Article title: Microwave-Vapor Heating Technique for Mango Quarantine Treatment: Oriental Fruit Fly Mortality and Fruit Quality

Submitted: 29 Aug 2005

Editorial Office: Dr Ian B. Ferguson

Article type: Full length article

First author: Jatuphong Varith

Submitting author

Name: Jatuphong Varith

Department: Dept. of Agricultural and Food Engineering

Organisation: Maejo University

Addressline: A. Sunsai

City/Town: Chiang Mai

Zip/Postcode: 50290

Email: jatuphon@mju.ac.th

Phone: +6653878123

Fax: +6653498902

Keywords: Mango; Microwave-vapor heat; Oriental fruit fly; Quality; Quarantine treatment;

Files:

covering_letter.txt - Covering letter text - Format: Ascii text suggestedreviewers.txt - Author suggested reviewers text - Format: Ascii text Figure 1-v2.doc - Black and white figure - Format: Microsoft Word Figure 3-v2.doc - Black and white figure - Format: Microsoft Word Figure 7-v2.doc - Black and white figure - Format: Microsoft Word Figure 9-v2.doc - Black and white figure - Format: Microsoft Word Mango quarantine-V2.doc - Manuscript - Format: Microsoft Word Figure 10-v2.doc - Black and white figure - Format: Microsoft Word Figure 6-v2.doc - Black and white figure - Format: Microsoft Word Figure2-v2.tif - Black and white figure - Format: TIFF Figure 4-v2.doc - Black and white figure - Format: Microsoft Word Figure 5-v2.doc - Black and white figure - Format: Microsoft Word Figure 8-v2.doc - Black and white figure - Format: Microsoft Word

